

Optimierung und Test der digitalen Hochfrequenzregelung und Entwicklungen für das EPICS-basierte Beschleunigerkontrollsystem am S-DALINAC

Optimization and test of a digital radio-frequency control system and developments for
the EPICS-based accelerator control system at the S-DALINAC

Dissertation von Christoph Warwick Burandt, November 2016



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Fachbereich Physik
Institut für Kernphysik
S|DALINAC

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: [urn:nbn:de:tuda-tuprints-59307](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-59307)

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/5930>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,
E-Publishing-Service der TU Darmstadt.

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>
tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Diese Veröffentlichung steht unter der Creative-Commons-Lizenz:
Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Optimierung und Test der digitalen Hochfrequenzregelung und Entwicklungen für das EPICS-basierte Beschleunigerkontrollsystem am S-DALINAC

Vom Fachbereich Physik
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

angefertigt von

M.Sc. Christoph Warwick Burandt
aus Frankfurt am Main

Referent: Prof. Dr. Joachim Enders
Korreferent: Prof. Dr. Dr. h.c. Norbert Pietralla

Tag der Einreichung: 21.11.2016
Tag der Prüfung: 21.12.2016

Darmstadt 2017

D 17

Zusammenfassung

Der erste Teil dieser Dissertation thematisiert Erweiterungen an der digitalen Hochfrequenzregelung des Elektronenbeschleunigers S-DALINAC. Diese umfassen die Inbetriebnahme von piezoelektrisch angetriebenen Frequenzabstimmern der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen. Hierfür wurde ein mit der vorhandenen Elektronik kompatibles Netzteil entwickelt, welches die Piezoaktuatoren versorgt. Weiterhin wurde die Flexibilität der Hochfrequenzregelung an supraleitenden Viertelwellenresonatoren des Ionenbeschleunigers ALPI demonstriert. Diese von den Beschleunigungsstrukturen des S-DALINAC sehr verschiedenen 160-MHz-Resonatoren konnten erfolgreich mit Regelabweichungen in Phase und Amplitude von $\Delta A/A \leq 2 \cdot 10^{-4}$ und $\Delta \varphi \leq 0,1^\circ$ betrieben werden.

Teil zwei beschreibt die Migration des Beschleunigerkontrollsystems auf ein EPICS-basiertes System. Eine Vielzahl von Geräten mit unterschiedlichen Schnittstellen und Protokollen wurde integriert und allgemeine Funktionalität höherer Ebene wurde vereinheitlicht. Im Rahmen des Einbaus der dritten Rezirkulation wurde eine Motorisierung der Strahl-Weglängenverstellung vorgenommen.

Abstract

The first part of this thesis covers multiple extensions of the digital low-level radio-frequency control system of the electron accelerator S-DALINAC. This comprises bringing into regular operation the piezoelectrically driven fine tuners of the superconducting cavities. For this a power supply series has been developed, which is compatible with the existing electronics and can power the piezo elements. Furthermore the flexibility of the radio-frequency control system has been demonstrated on superconducting quarter-wave-resonators of the ion accelerator ALPI. These 160 MHz cavities are quite different to the S-DALINAC's acceleration structures but could be operated successfully with low residual errors in phase and amplitude nevertheless.

The second part describes the migration of the accelerator control system to an EPICS-based system. A multitude of devices with a diversity of interfaces and protocols have been integrated and higher-level functionality has been unified. Within the framework of the construction of the third recirculation beam-line, the beam-path-length adjustment mechanism was motorized.

Abkürzungsverzeichnis

μC	Mikrocontroller
ADC	Analog-to-Digital Converter
ASCII	American Standard Code for Information Interchange – definiert die Kodierung von Zeichen, anhand von 7-Bit-Zahlen
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
CA	Channel Access
CAN	Controller Area Network
DAC	Digital-to-Analog Converter
DALINAC	Darmstadt Linear Accelerator
DHIPS	Darmstadt High-Intensity Photon Setup
DMZ	Demilitarized Zone - Computernetzwerk spezieller Konfiguration
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EPICS	Experimental Physics and Industrial Control System
ERL	Energy Recovery linac
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSM	Finite State Machine
GPIO	General-Purpose Input Output
HF	Hochfrequenz
IOC	Input Output Controller
LAN	Local Area Network
LLBBC	Low-Level Based-Band Controller
LVDS	Low Voltage Differential Signaling
MPI	Multi Point Interface – proprietäre Kommunikationsschnittstelle von Siemens Simatic-S7-Geräten
NEPTUN	Niederenergie-Photonen-Tagger

OPI	Operator Interface – Software, welche häufig eine graphische Bedienoberfläche für Operateure darstellt
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logic Controller (engl. für SPS)
PLL	Phase-Locked Loop
QAM	Quadraturamplitudenmodulation
QWR	Quarter-Wave-Resonator
RMS	Root Mean Square
S-DALINAC	Superconducting Darmstadt Linear Accelerator
SPIN	S-DALINAC Polarized injector
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Transmission Control Protocol
TCP/IP	Steht stellvertretend für die im Internet eingesetzten Protokolle
UDP	User Datagram Protocol
USB	Universal Serial Bus
VCO	Voltage-Controlled Oscillator

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Instrumente der experimentellen Kernphysik	2
1.3. Teilchenbeschleuniger	2
1.4. S-DALINAC	3
1.5. Übergeordnete Ziele dieser Dissertation	8
I. Entwicklungen für die digitale Hochfrequenz-Regelung	11
2. Digitale Hochfrequenzregelung des S-DALINAC	12
2.1. Anforderungen	12
2.2. Konzept	13
2.3. Hochfrequenzplatine	14
2.4. Basisbandplatine	15
2.5. Erweiterung um weitere Kanäle	16
2.6. Einsetzbarkeit für andere Anwendungen	19
3. Piezoelektrische Frequenzsteller	20
3.1. Vorteil piezoelektrischer Stellelemente	21
3.2. Aufbau der piezoelektrischen Frequenzsteller	24
3.3. Integration in den Regelbetrieb	26
3.4. Fazit	35
4. Test der digitalen Hochfrequenzregelung an einem 160-MHz-Viertelwellenresonator	36
4.1. Hochfrequenzmodul	36
4.2. Regelung eines 160-MHz-Viertelwellenresonators	41
II. Entwicklungen für das Beschleuniger-Kontrollsystem	45
5. Entstehung des EPICS-basierten Beschleunigerkontrollsystems	46
5.1. Das EPICS-Software-Framework	46
5.2. Frühere Kontrollsysteme am S-DALINAC	53
5.3. Beginn der Migration auf EPICS	54

5.4. Beweggrund für die weitere Migration	55
6. Migration des Beschleunigerkontrollsystems	57
6.1. Strategie der Migration	57
6.2. Überblick über Subsysteme des Beschleunigers	57
6.3. Integration von Geräten mit unterschiedlichen Hardwareschnittstellen	58
6.4. Einbindung von Geräten und Subsystemen	64
6.5. Übersicht: Input/Output Controller	73
6.6. Zusammenfassung zum Status der Migration	75
6.7. Nachteile der derzeitigen Kontrollsystemstruktur	76
7. Steuerung beweglicher Strahlführungselemente	79
7.1. Anwendungen beweglicher Strahlführungselemente	79
7.2. Implementierung der Motorsteuerung	81
7.3. Integration in das Kontrollsystem	85
7.4. Inbetriebnahme und Ausblick	86
8. Übergeordnete Kontrollsystemfunktionalität	88
8.1. Verteilung der Konfiguration	88
8.2. Speicherung des Zustandes der Strahloptik	92
8.3. Web-basierte Oberflächen	96
8.4. Einrichtung von <i>Channel-Access-Gateways</i>	98
Zusammenfassung und Ausblick	103
A. Einfluss der Stickstoffbefüllung auf Regelabweichungen von Phase und Amplitude	106
B. Anpassung des <i>llbbcusb-Device-Support-Software</i>moduls	107
B.1. Hintergrund	107
B.2. Bestehende Implementierung	108
B.3. Vorgenommene Veränderungen	112
C. Verteilung des Referenzphasensignals	113
C.1. Anforderung	113
C.2. Aufbau	113
D. EPICS Process Variable Gateway	115
Literaturverzeichnis	127

1. Einleitung

1.1. Motivation

Der Gewinn eines tiefen Verständnisses der Physik der Atomkerne stellt eine große Herausforderung für theoretische Modellbildung, experimentelle Techniken und deren instrumentelle Realisierung dar.

Physikalische Modelle des Atomkerns müssen im Allgemeinen die Effekte von drei der vier elementaren Wechselwirkungen berücksichtigen. Dabei erschwert insbesondere der Beitrag der starken Wechselwirkung die Aufstellung der Modelle. Die als solche bezeichnete Kernkraft ist tatsächlich die Restwechselwirkung zwischen den Nukleonen. Eine besondere Erschwernis stellt die Anzahl der Wechselwirkungspartner dar. Sie beträgt maximal wenige hundert und verbietet somit in der Regel eine Anwendung der Methoden der Statistik. Andererseits ist sie für die Mehrheit der Atomkerne dennoch so hoch, dass eine vollständige Formulierung aller Einzelwechselwirkungen nicht möglich ist.

Neben der physikalischen Modellbildung stellt auch die experimentelle Kernphysik immer höhere Anforderungen an Forschung und Entwicklung. Zur Untersuchung von Kernen eignen sich unter anderem Photonen, Elektronen und Nukleonen. In Streuexperimenten werden diese zunächst beschleunigt, dann an Atomkernen gestreut und schließlich die Auswirkungen auf die beiden Streupartner gemessen. Gemäß den Gesetzen der Quantenmechanik wird die bei solchen Experimenten erzielte Ortsauflösung durch den Impuls der verwendeten Sonde bestimmt. Demnach ist für die Erforschung von Atomkernen die Verwendung von Sondenteilchen mit hohen Impulsen – typischerweise wenige MeV/c bis 500 MeV/c – erforderlich. Deren kontrollierte Bereitstellung erfordert komplexe technische Anlagen. Dies trifft im gleichen Maße auf die Messtechnik zu, die zur Beobachtung der verursachten Reaktionen verwendet wird. Während die verwendeten Messeinrichtungen zum Teil großtechnische Ausmaße erreichen, sind die von einzelnen Teilchen verursachten Signalhöhen oft sehr gering und erfordern eine aufwendige Aufbereitung.

Der erzielbare Kenntnisgewinn ist in der Kernphysik, experimentell wie theoretisch, sehr vielfältig. Neben den aus der experimentellen Kernphysik hervorgegangenen industriellen Anwendungen, wie z. B. der Kernenergie, sind auch therapeutische und diagnostische Verfahren in der Medizin entstanden. Aber

auch zu wissenschaftlichen Fragen, welche über die Aufklärung der Struktur der Kerne selbst hinaus gehen, kann diese Forschung beitragen. So erfordert ein Verständnis der beobachteten Häufigkeit der einzelnen chemischen Elemente ein genaues Wissen über die verschiedenen Nukleosyntheseprozesse. Die Wirkungsquerschnitte der hierbei stattfindenden Umformungsprozesse lassen sich in Experimenten bestimmen. Ein weiterer, rein wissenschaftlich motivierter Aspekt, ist die Untersuchung des Atomkerns als Vielteilchenquantensystem an sich. Mit Hilfe von kernphysikalischen Experimenten entwickelte theoretische Techniken lassen sich auch auf andere Vielteilchenquantensysteme anwenden.

1.2. Instrumente der experimentellen Kernphysik

Hochenergetische Teilchen wurden zu Beginn dieses Forschungsgebiets durch radioaktive Quellen bereitgestellt. So nutzte Rutherford für das Experiment, das die Existenz eines Atomkerns nahelegte, Präparate aus Alpha- und Betastrahlern [1]. Später wurde die Höhenstrahlung untersucht und es konnten bis dahin unbekannte Teilchen entdeckt werden [2]. Auch heutzutage ist die Höhenstrahlung ein aufwendig untersuchtes Phänomen, insbesondere in Hinblick auf astrophysikalische Fragestellungen zur Entstehung dieser Strahlung.

Die moderne Kernphysik nutzt für eine Vielzahl von Experimenten Teilchenbeschleuniger. Diese bieten Teilchenstrahlen höherer Energie und Intensität, als dies mit radioaktiven Präparaten möglich ist. Teilchenart und Energie der Strahlung sind darüber hinaus den Anforderungen entsprechend in weiten Grenzen einstellbar.

Weiterhin muss die durch Strahlung induzierte Reaktion anhand von gestreuten Teilchen nachgewiesen und vermessen werden. Als Detektoren kamen zunächst fotografische Platten und direkt beobachtete szintillierende Materialien sowie Elektrometer zum Einsatz. Später wurden fotografisch erstellte Aufnahmen von Nebel- und Blasenkammern bereits mit Hilfe von Computern ausgewertet [3]. In modernen Experimenten kommen praktisch ausschließlich elektronisch auslesbare Detektoren unterschiedlicher Typen zum Einsatz.

1.3. Teilchenbeschleuniger

Die ersten künstlichen Teilchenbeschleuniger nutzten elektrische Gleichspannung zur Beschleunigung der Teilchen. Mit einem Cockcroft-Walton-Beschleuniger gelang die erste durch einen Teilchenbeschleuniger induzierte Kernreaktion [4, 5, 6].

Als Hochspannungsquelle für die höchsten Spannungen kommen heutzutage Van-de-Graaff-Generatoren zum Einsatz. Die Erzeugung einer Spannung von 20 MV ist technisch bereits sehr anspruchsvoll und wird aufgrund von Koronaentladungen kaum übertroffen [7]. Van-de-Graaff-Generatoren werden in der Beschleunigertechnik häufig an Tandem-Beschleunigern eingesetzt, um Ionen zu beschleunigen.

Teilchen auf höhere Energien zu beschleunigen gelingt durch den Einsatz von elektromagnetischen Wellen. Erstmals wurde nach den Vorschlägen von Ising [8] dieses Prinzip in einem Linearbeschleuniger von Wideröe umgesetzt [9]. Kurze Zeit später gelang Lawrence und Livingston die Inbetriebnahme des ersten Zyklotrons [10]. Beide Maschinen bildeten die Ausgangspunkte für die Entwicklung der späteren Kreis- und Linearbeschleunigeranlagen.

Die beiden in dieser Arbeit bearbeiteten Teilbereiche – die Hochfrequenzregelung und computergestützte Beschleunigerkontrollsysteme – entwickelten sich mit zunehmenden Anforderungen und Komplexität der Beschleuniger. So wurden einfache Regelungssysteme für die kontinuierliche Anpassung der Frequenz der beschleunigenden Wechselfelder bereits in der Frühphase der Synchrotrons vorgeschlagen [11]. Später wurde der Betrieb von Experimenten und Beschleunigern zunehmend durch Computer unterstützt [3]. Heutzutage sind ein computergestütztes Kontrollsystem und eine aktive Regelung der Felder in den Hochfrequenzresonatoren Teil nahezu jeden Beschleunigers.

Die Anforderungen an das Beschleunigerkontrollsystem unterscheiden sich für verschiedene Anlagen. Lineare Beschleuniger wie der unten beschriebene S-DALINAC sind einfacher zu steuern als ein Komplex aus Synchrotrons und Speicherringen. Diese erfordern eine zeitlich hochgenaue Ablaufsteuerung, während Injektions- und Extraktionsvorgängen. Das in Teil II näher erläuterte Kontrollsystem-Software-Framework EPICS wird am S-DALINAC mit kostengünstiger PC-Hardware verwendet. Echtzeitanforderungen sind dabei nicht zu erfüllen, da der S-DALINAC im *continuous-wave*-Modus betrieben wird.

1.4. S-DALINAC

In diesem Abschnitt wird zunächst der Elektronenbeschleuniger S-DALINAC des Institut für Kernphysik vorgestellt. Anschließend werden die Experimentierplätze diskutiert.

1.4.1. Beschleuniger

Als Quelle hochenergetischer Elektronen diente am Institut für Kernphysik der damaligen TH Darmstadt ab Mitte der sechziger Jahre der normalleitende *Darmstädter Linearbeschleuniger* DALINAC [12]. Er erreichte durch spätere Erweiterungen eine Maximalenergie von 70 MeV [13]. Die bei Elektronenstreuexperimenten erreichbare Auflösung wurde durch eine Anpassung der Dispersion der Strahlführung an die des Spektrometers optimiert [14]. Ende der achtziger Jahre wurde der Aufbau des supraleitenden S-DALINAC begonnen. Er ersetzte schließlich den DALINAC [15]. Er wurde für Elektronenstrahlen von Energien von bis zu 130 MeV und Strahlströmen von 20 μA vorgesehen. Während der 12-jährigen Förderung durch den Sonderforschungsbereich 634 „*Kernstruktur, nukleare Astrophysik und fundamentale Experimente bei kleinen Impulsüberträgen am supraleitenden Darmstädter Elektronenbeschleuniger S-DALINAC*“ diente er als zentrales Forschungsgrößgerät. In diesem Rahmen wurden Maßnahmen zur Verbesserungen der Energieschärfe und Intensität des Elektronenstrahls umgesetzt. Unter anderem wurde die in der vorliegenden Arbeit weiterentwickelte digitale Hochfrequenzregelung in Betrieb genommen [16], eine Quelle für spinpolarisierte Elektronen eingebaut [17] und das nicht-isochrone Rezirkulieren erfolgreich bei Strahlzeiten eingesetzt [18]. Derzeit werden die Arbeiten an einer dritten Rezirkulationsstrahlführung zur Erhöhung der im Dauerbetrieb verfügbaren Strahlenergie [19] und einem Scraper-System in der Extraktionsstrahlführung [20] abgeschlossen. Die neue Rezirkulationsstrahlführung erlaubt es den S-DALINAC auch als *energy recovery linac* (ERL) zu betreiben. Diese Betriebsart von Beschleunigern soll zukünftig am S-DALINAC intensiv erforscht werden. Hierzu wurde gemeinsam mit dem Institut für Kernphysik der Johannes Gutenberg-Universität Mainz und dem Institut für *Theorie Elektromagnetischer Felder* der Technischen Universität Darmstadt das Graduiertenkolleg 2128 „*Accelerator Science and Technology for Energy Recovery Linacs*“ eingerichtet. Die enge Zusammenarbeit ermöglicht, dass der an der JGU Mainz im Aufbau befindliche Hochstrom-ERL MESA (*Mainz Energy recovering Superconducting Accelerator*), von den in Zukunft am S-DALINAC gewonnenen Erkenntnissen profitieren kann. Im Rahmen des im Jahr 2016 angelaufenen Sonderforschungsbereich 1245 „*Atomkerne: Von fundamentalen Wechselwirkungen zu Struktur und Sternen*“ ist die Durchführung kernphysikalischer Experimente am S-DALINAC vorgesehen.

Abbildung 1.1 zeigt schematisch den S-DALINAC. Vor der Beschleunigung werden die freien Elektronen durch thermische Emission oder durch Photoemission erzeugt. Letzteres geschieht in der nachträglich aufgebauten Quelle spinpolarisierter Elektronen [17, 21]. Der elektrostatisch vorbeschleunigte Strahl wird von einem Chopper-Resonator und einer Schlitzblende gegebenenfalls in einen

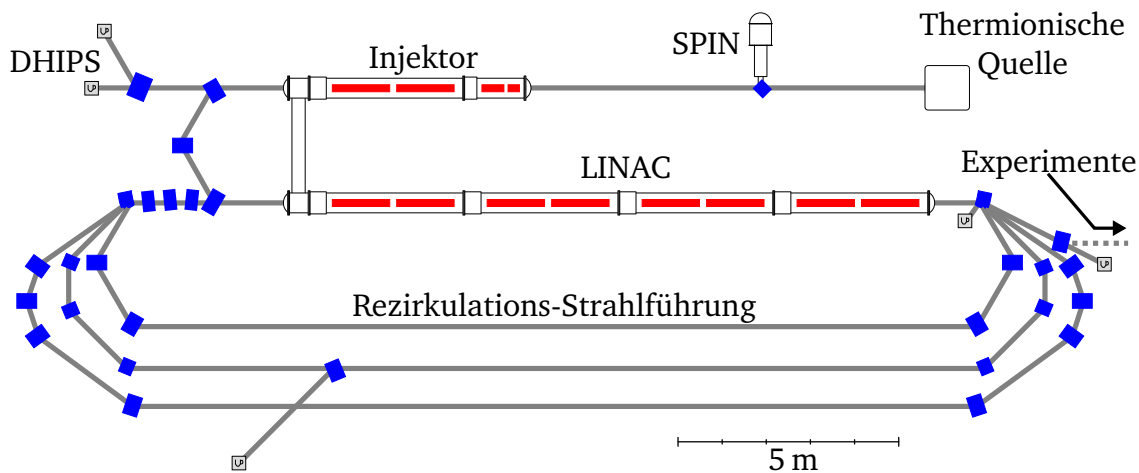


Abb. 1.1.: Schematische Darstellung des S-DALINAC. Der Strahl wird entweder mit einer thermionischen Quelle oder von einer Spin-polarisierenden Quelle (SPIN) erzeugt. Im supraleitenden Injektor wird der Strahl auf bis zu 10 MeV beschleunigt. Er kann entweder am DHIPS-Messplatz für Experimente mit Bremsstrahlung verwendet, oder in den Hauptbeschleuniger (LINAC) eingeschossen werden. Dieser kann ihn maximal auf einen Designwert von 120 MeV – 130 MeV beschleunigen (vgl. Text). Die weiteren Experimente sind in einer anderen Halle aufgebaut.

gepulsten Strahl umgeformt. Nachfolgend werden die Strahlpulse mittels zweier Prebuncher longitudinal in die erste Beschleunigungsstruktur fokussiert. Diese supraleitenden, mehrzelligen Hohlraumresonatoren erlauben es, den Strahl im *continuous-wave*-Modus zu beschleunigen. Im Injektorbeschleuniger kann die Strahlenergie auf bis zu 10 MeV erhöht werden. Er besteht aus einer einzelnen zweizelligen, einer fünfzelligen und zwei zwanzigzelligen Beschleunigungsstrukturen. Der Strahl kann von dort geradeaus auf ein Bremstarget geführt werden, um die zuvor beschriebene Methode der *Kernresonanz-Floureszenz* zu ermöglichen. Ein für die Messung der Strahlenergie dedizierter Ablenkmagnet kann die Elektronen alternativ auf einen Diagnosemessplatz umlenken. Dort kann der Strahlstrom gemessen und der Intensitätsquerschnitt des Strahls auf einem Leuchtschirm bestimmt werden.

Für Experimente mit Bedarf an Elektronen höherer Energie muss der Elektronenstrahl zunächst in den Hauptbeschleuniger gelenkt werden. Dies geschieht durch einen 180°-Bogen. Der Strahl erfährt dabei zwischenzeitlich eine transversale Dispersionsaufweitung. Diese wird ausgenutzt, um Elektronen mit Energieabweichung größer 10^{-3} mit einem *Scraper-System* zu stoppen [22]. Im Hauptbeschleuniger war ursprünglich ein Energiegewinn von bis zu 120 MeV unter Verwendung von zwei Rezirkulationen vorgesehen. Da die Höhe der Verlustleistung der supra-

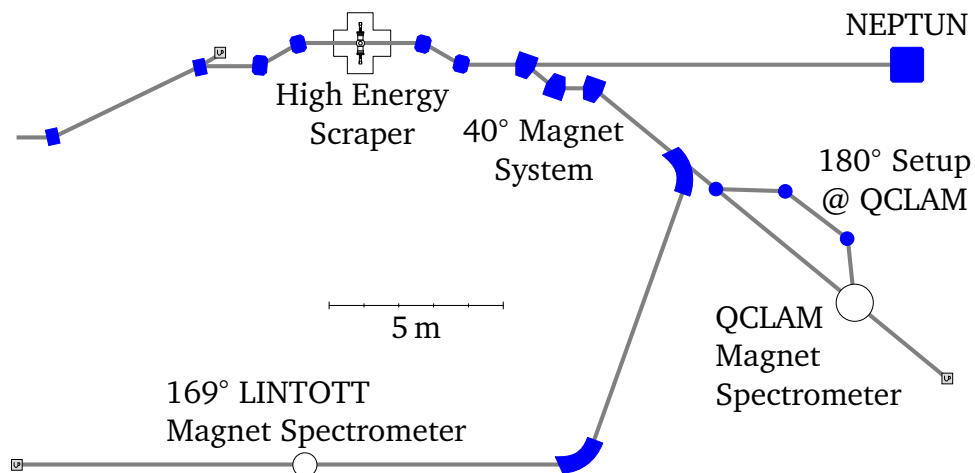


Abb. 1.2.: Schematische Darstellung der Extraktions-Strahlführung des S-DALINAC. Zunächst durchläuft der Strahl den *High Energy Scraper*. Ohne weitere Ablenkung gelangt er zum Elektronen-Tagger NEPTUN. Alternativ kann er durch eine weitere Schikane zu den Elektronenstreu-spektrometern LINTOTT und QCLAM geführt werden. Der Maßstab der Darstellung entspricht nicht dem von Abbildung 1.1.

leitenden Beschleunigerstrukturen den erwarteten Wert übersteigt [23], genügt die Leistung des installierten Heliumverflüssigers nicht für einen Dauerbetrieb bei den für diesen Energiegewinn erforderlichen Feldgradienten. Eine aktuelle Ergänzung ermöglicht dem Strahl das viermalige Passieren des Hauptbeschleunigers [19]. Somit können die Feldgradienten niedriger gewählt werden und bei gleichbleibender Kühlleistung eine maximale Elektronenenergie von mindestens 121,9 MeV [19] erzielt werden. Hierzu wird der Strahl nach jedem Hauptbeschleunigerdurchlauf im Separationsdipol aufgrund der jeweils anderen magnetischen Steifigkeit in vier unterschiedliche Strahlführungswege abgelenkt. Die ersten drei sind die Rezirkulationsstrahlführungen. Durch sie werden die Elektronen zu einem Rekombinationsmagneten transportiert und somit die zusätzlichen Durchläufe ermöglicht. Die vierte Strahlführung lenkt den Strahl zu den Experimenten.

Die Extraktionsstrahlführung ist in Abbildung 1.2 skizziert. Im ersten Abschnitt der Extraktionsstrahlführung wird die dispersive Strahlaufweitung durch Ablenkmagnete erneut genutzt, um mittels künstlich herbeigeführter Strahlverluste die relative Energieschärfe des verbleibenden Strahls zu erhöhen [20]. In Planung befindet sich in einer parallelen Strahlführung ein 130-MeV-Møller-Polarimeter [24, 25]. Es soll zur Bestimmung der Polarisation der Elektronen nach Passieren der Beschleunigungsstrukturen und diverser Ablenkmagnete dienen.

Im weiteren Verlauf der Extraktionsstrahlführung folgt der Strahl, abhängig vom

momentan bedienten Messplatz, unterschiedlichen Wegen. Ohne weitere Ablenkung gelangt er zum Photonen-Tagger NEPTUN. Durch Umlenken im sogenannten 40°-System wird er direkt zum QCLAM-Spektrometer gebracht oder über einen weiteren Ablenkmagneten in die Strahlführung des LINTOTT-Spektrometers.

1.4.2. Experimentieraufbauten

Derzeit stehen insgesamt vier fest eingerichtete Messplätze zur Verfügung. Zwei von diesen ermöglichen das Durchführen von Experimenten mit reellen Photonen. Am *Darmstadt High-Intensity Photon Setup* (DHIPS) werden diese als intensives, kontinuierliches Bremsstrahlungsspektrum erzeugt [26]. Mit diesem breitbandigen Gammastrahl wird eine Probe des zu untersuchenden Nuklids bestrahlt. Mehrere hochauflösende Detektoren aus hochreinem Germanium messen die Zerfälle der dabei angeregten Zustände. Dabei wird das gesamte Anregungsspektrum gleichzeitig aufgenommen. Diese Technik wird als *Kernresonanz-Floureszenz-Spektroskopie* bezeichnet. Am Messplatz des *Niederenergie-Photonen-Taggers* (NEPTUN) wird ebenfalls Bremsstrahlung erzeugt und auf das zu untersuchende Nuklid gerichtet. Allerdings wird die Restenergie eines zur Erzeugung eines Photons verwendeten Elektrons nach der Wechselwirkung mit einem dünnen Bremstarget in einem Spektrometer gemessen [27]. Die Differenz zur ursprünglichen Energie des Elektrons entspricht dann der Energie des Photons. Die Signale des Spektrometers und der den Zerfall beobachtenden Detektoren werden koinzident ausgewertet. Dies erlaubt eine Zuordnung zwischen der Energie des Photons und der von ihm verursachten Anregungen zu den detektierten Übergängen und Zerfällen. Somit können Wirkungsquerschnitte energieaufgelöst bestimmt werden.

Den beiden beschriebenen Messplätzen stehen zwei weitere für Experimente mit virtuellen Photonen gegenüber. An Kernen gestreute Elektronen werden dort von drehbaren Spektrometern vermessen. Das LINTOTT-Spektrometer kam bereits am früheren Elektronenbeschleuniger DALINAC zum Einsatz [14]. Das QCLAM-Spektrometer, welches insbesondere die Messung von um 180° gestreuten Elektronen ermöglicht [28] sowie Koinzidenzexperimente [29], wurde nach Aufbau des S-DALINAC in Betrieb genommen.

1.5. Übergeordnete Ziele dieser Dissertation

1.5.1. Stabilität und Zuverlässigkeit

Die in dieser Arbeit bearbeiteten Aspekte lassen sich unter dem Gesichtspunkt der Verbesserung der Stabilität des Strahlbetriebs zusammenfassen. Die Aufnahme qualitativ hochwertiger Messdaten an den unterschiedlichen Experimenten erfordert zunächst eine geeignete Einstellung der Strahlparameter. Die Dauer der anschließenden Datenaufnahme beträgt typischerweise einige Stunden bis wenige Wochen. Ausschlaggebend hierfür sind der Wirkungsquerschnitt der beobachteten Reaktion und die gewünschte statistische Genauigkeit. In dieser Zeit muss die Stabilität der für das jeweilige Experiment entscheidenden Strahlparameter gewährleistet sein. Abweichungen der Strahlparameter vom Soll erfordern Unterbrechungen zur Korrektur. Allgemein verlängern Unterbrechungen, auch z. B. aufgrund technischer Störungen, die benötigte Messzeit. Somit können innerhalb einer Strahlzeit weniger Daten aufgenommen werden als im Idealfall möglich wäre. Ziel ist es daher, die Unterbrechungen auf ein Mindestmaß in Häufigkeit und Dauer zu begrenzen.

Hierzu folgt zunächst eine Darstellung der Betriebsverhältnisse am S-DALINAC. Experimente finden innerhalb der Strahlzeiten im Schichtbetrieb statt. Die Steuerung und Überwachung erfolgt außerhalb der Arbeitszeiten der Belegschaft durch studentische Hilfskräfte. Diese können nicht im gleichen Maße ausgebildet werden wie regulär angestelltes Personal und weisen daher in der Regel eine geringere Expertise auf. Um unter diesen Randbedingungen den Umgang mit Abweichungen im Betrieb möglichst reibungslos zu ermöglichen, ist ein leistungsfähiges Beschleunigerkontrollsystem zur Unterstützung erforderlich. In der betrieblichen Praxis stellt sich weiterhin die Infrastruktur des Beschleunigers als mindestens ebenso wichtig heraus. So dient flüssiges Helium zum Herstellen der Betriebstemperatur der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen. Der Verflüssigungsprozess muss kontinuierlich überwacht werden, um die Entwicklung der Kälteleistung einschätzen zu können und sich entwickelnde Störungen frühzeitig zu erkennen, aber auch, um eingetretene Störungen später analysieren zu können.

Abschließend soll die Wichtigkeit der Verfügbarkeit der Messgrößen *Strahlstrom* und *Flugzeit* im Kontrollsystem erwähnt werden. Eine kontinuierliche Überwachung derselben vereinfacht die Einstellung des Beschleunigers und die Analyse von Fehlersituationen. Dieser Aspekt wurde in dieser Arbeit insofern bearbeitet, dass die für die Auswertung von Hochfrequenzsignalen benötigte Elektronik in das Kontrollsystem integriert wurde.

1.5.2. Technische Schulden

Ziel dieser Arbeit war die Verbesserung der Stabilität, Verfügbarkeit und Kompatibilität der Beschleunigersteuerung durch Migration der Steuerungssoftware auf ein EPICS-basiertes System (EPICS: Experimental Physics and Industrial Control System). Dieses Projekt wurde in [16] begonnen. Die Motivation für diese Umstellung ging auf die Notwendigkeit der Reduzierung der *Technischen Schulden* zurück. Dieser Begriff stammt aus der Informatik und verdeutlicht in Analogie zu finanziellen Schulden, dass eine technische Lösung immer wieder zusätzliche Kosten verursacht, wenn sie nicht optimal gewählt wird [30].

Am S-DALINAC trifft dies zum Beispiel auf die Einbindung neuer Geräte, wie beispielsweise Magnetnetzteile, zu. Auf Basis eines homogenen, gut gepflegten Systems mit klaren Strukturen verursacht die Einbindung eines solchen Gerätes gewisse Kosten (d. h. nimmt vor allem eine gewisse Arbeitszeit in Anspruch). In einem weniger gut gepflegten System mit vielen komplexen Abhängigkeiten und inhomogener Struktur muss demgegenüber mit erhöhtem Aufwand gerechnet werden. Dieser Aufwand kann schlimmstenfalls Ausmaße annehmen, die zu der Entscheidung führen, von der Einbindung eines Gerätes ganz abzusehen. Das kann tatsächlich erfolgen, wenn es keine fundamentale Bedeutung für den Strahlbetrieb hat. Am S-DALINAC traf dies in der Vergangenheit etwa auf die Instrumentierung der Kälteerzeugung oder des Vakuumsystems zu. Somit können Störungen mitunter erst spät erkannt und mitunter nur unzureichend dokumentiert werden. Ein ebenfalls in der Vergangenheit wiederholt gewählter Weg führte für einzelne Subsysteme, beispielsweise der Strahlstrommessung, zu Insellösungen im Beschleunigerkontrollsystem. Dabei wurde die Integration neuer Funktionalität in das bestehende Beschleunigerkontrollsystem vermieden. Stattdessen wurde für die Ansteuerung des betreffenden Subsystems eine mit dem restlichen Kontrollsystem inkompatible Software erstellt. Dies entspricht der Aufnahme neuer Schulden, da das System weiter an Homogenität verliert und spätere Arbeiten somit zusätzlich erschwert werden.

Die Analogie der *Technischen Schulden* ist insofern weitergehend zutreffend, dass die vorübergehende Aufnahme solcher durchaus sinnvoll sein kann. So ist die technisch suboptimale Lösung wünschenswert, falls die Umsetzung auf diesem Wege schneller zu erreichen ist, um eine Fortsetzung des Strahlbetriebs zu erlauben. Unverzichtbar ist bei diesem Vorgehen allerdings, dass Schulden nicht in zu großem Umfang aufgenommen werden, also eine technisch möglichst optimale Lösung zeitnah bereitgestellt wird.

Die Migration des Beschleunigerkontrollsystems führt in diesem Bilde zu einer Reduzierung der Schulden. Maßgeblich hierfür ist die Vereinheitlichung. Sie schafft

eine Struktur, in welcher klar ersichtlich ist, wie die Integration neuer Gerätetypen erfolgen sollte. Entwickler können einmal Erlerntes in vielen Bereichen des Systems anwenden. Ausführliche Erläuterungen zu diesen Aspekten folgen in Teil II.

Bemerkung zu Softwarequelltexten

Quelltexte werden in der vorliegenden Schrift weder an den solche thematisierenden Stellen noch in einem Anhang abgedruckt. Aufgrund des Umfangs wäre diese Praxis sehr unzweckmäßig. Sie liegen vollständig und für alle Mitarbeiter des Instituts für Kernphysik der TU Darmstadt zugänglich im zentralen Versionsverwaltungssystem des S-DALINAC vor [31].

Teil I.

Entwicklungen für die digitale Hochfrequenz-Regelung

2. Digitale Hochfrequenzregelung des S-DALINAC

Im Folgenden wird die digitale Hochfrequenzregelung beschrieben, die in [16] in Betrieb genommen worden war. Sie wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit erweitert und in ihrer Funktionalität getestet. Die Abschnitte 2.1 und 2.2 beschreiben die Anforderungen, die von diesem System erfüllt werden müssen, und das Konzept der Umsetzung. Anschließend wird die Elektronik der frequenzspezifischen Hochfrequenzplatine (Abschnitt 2.3) und der Basisbandplatine (Abschnitt 2.4) beschrieben. Abschnitt 2.5 dieses Kapitels beschreibt die Erweiterung des Systems. Das folgende Kapitel geht auf die Integration der piezoelektrischen Antriebe der Frequenzsteller ein. Im letzten Kapitel wird der Test der digitalen Hochfrequenzregelung an 160-MHz-Viertelwellenresonatoren beschrieben.

2.1. Anforderungen

An den S-DALINAC werden insbesondere für Elektronenstreuexperimente hohe Anforderungen an die Strahlqualität gestellt. Um die Unsicherheiten der in den Spektrometern ermittelten Anregungsenergien nicht zu dominieren, muss die relative Energieschärfe des Elektronenstrahls $\Delta E_{\text{rms}}/E < 10^{-4}$ genügen.

Daraus ergeben sich entsprechende Anforderungen an die Hochfrequenzregelung. Sie kontrolliert Phase und Amplitude der Wechselfelder aller in der Strahlführung befindlichen aktiven Hochfrequenzresonatoren. Dabei müssen sowohl die normalleitenden Resonatoren des vorderen Injektorabschnitts [32], als auch die supraleitenden Niobstrukturen des Injektors [33] und des Hauptbeschleunigers geeignet betrieben werden. Die reine Hochfrequenzleistung wird von Klystren und unterschiedlichen Typen von Halbleiterverstärkern bereitgestellt. Die genaue Phasenlage und Amplitude lassen sich nur durch aktive Rückkopplung im geforderten Maße einhalten. Hierzu koppeln Antennen aus allen aktiven Hochfrequenzresonatoren Signale niedriger Leistung (wenige mW) aus. Aus diesen lassen sich durch Gleichrichtung die Amplitude und durch Vergleich mit einem Referenzsignal die Phase des Feldes im Innern des Resonators bestimmen. Aus den Abweichungen von den jeweiligen Sollwerten lässt sich für jeden Resonator ein geeignetes Signal erzeugen, welches nach entsprechender Verstärkung wieder in die Resonatoren eingebracht wird und den gemessenen Abweichungen entgegenwirkt.

Eine weitere Anforderung stellt die Abstimmung der Resonanzfrequenz der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen im Kryostaten dar. Bei Veränderung der radialen Ausdehnung eines Resonators kommt es zu einer Verschiebung seiner Resonanzfrequenz. Äußerer Ursachen von solchen Verformungen muss daher entsprechend entgegengewirkt werden. Für eine gelegentliche grobe Abstimmung werden hierzu Gleichstrommotoren eingesetzt. Die Feinabstimmung findet im Leistungsbetrieb kontinuierlich statt. Als Stellelemente für diese Eigenfrequenzregelung wurden bisher stromgetriebene magnetostruktive Elemente verwendet. Inzwischen wurde die Umstellung auf spannungsgetriebene piezoelektrische Aktuatoren begonnen. Diese Thematik wird in Kapitel 3 ausführlich beschrieben.

2.2. Konzept

Das Konzept der digitalen Hochfrequenzregelung wurde zunächst an Prototypen entwickelt [34, 35] und getestet [36]. Später wurden im Rahmen von [37, 38] und [16] neue Revisionen entwickelt und schließlich in den regulären Betrieb überführt [39].

Die Grundidee, die schnelle Dynamik der 3-GHz-Schwingung von der langsamen Dynamik der Schwankungen von Feldamplitude und -phase voneinander zu trennen, wurde von der zuvor eingesetzten Hochfrequenzregelung [40] übernommen. Hierzu werden die Signale zunächst in das Basisband transformiert. Somit kann die eigentliche Regelung im Niederfrequenzbereich stattfinden. Diese Basisbandsignale werden digitalisiert und von einem auf einem *Field Programmable Gate Array* (FPGA) implementierten Regler verarbeitet. Die so berechneten Korrekturwerte für Phase und Amplitude der vorlaufenden Hochfrequenzwelle werden anschließend wieder analogisiert und dem Hochfrequenzsinussignal aufmoduliert. Ein Verstärker stellt die für den Strahlbetrieb erforderliche Leistung zur Verfügung.

Die Parameter, welche das genaue Verhalten der Regler bestimmen, werden von einem Mikrocontroller überwacht. Dieser enthält auch eine integrierte Elektronik zur Anbindung an ein CAN-Bus-Segment (CAN: *Controller Area Network*). Über diese Schnittstelle kann mit anderen Geräten und insbesondere den Kontrollsystemcomputern kommuniziert werden. Abbildung 2.1 fasst die beschriebene Grundidee der Hochfrequenzregelung zusammen.

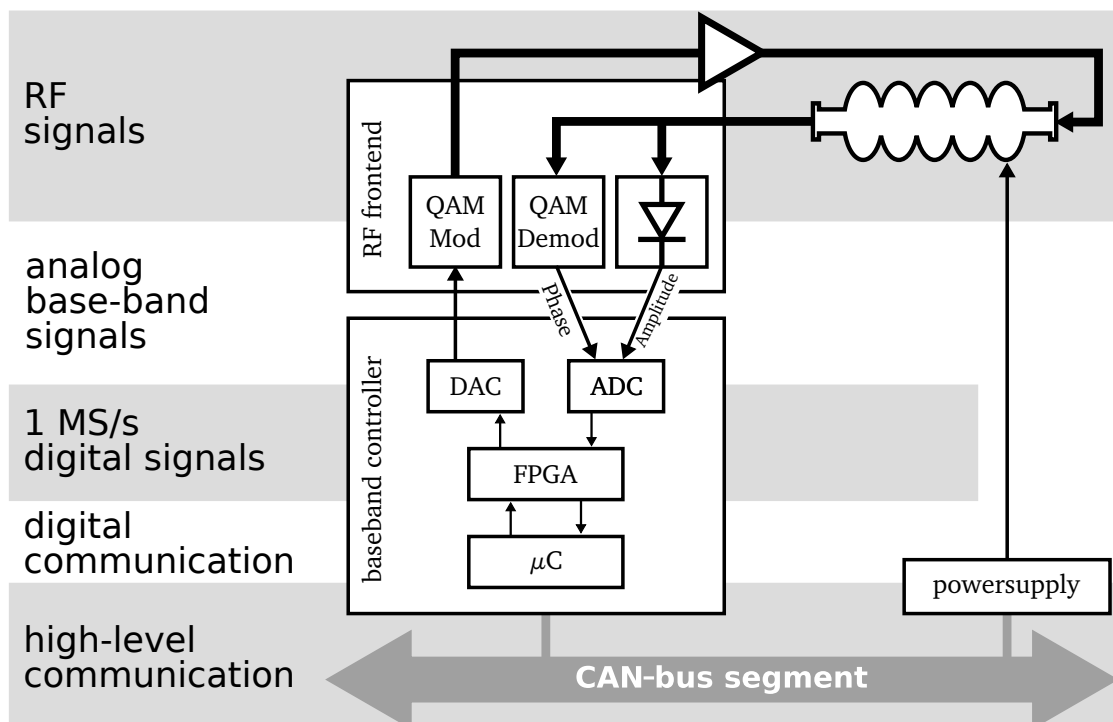


Abb. 2.1.: Konzeptioneller Aufbau der digitalen Hochfrequenzregelung des S-DALINAC. Die Phasen- und Amplitudeninformation wird durch analoge Quadraturamplitudenmodulation (QAM) in das Basisband überführt. Diese analogen Signale werden anschließend mit einer Auflösung von 18 bit bei 1 MS/s digitalisiert. Die schnelle Signalverarbeitung findet in einem FPGA statt. Ein Mikrocontroller erlaubt die Kommunikation mit anderen Geräten, z. B. Netzteilen für den Betrieb des Abstimmmechanismus.

2.3. Hochfrequenzplatine

Aufgabe der Hochfrequenzplatine ist die erwähnte Transformation der Hochfrequenzsignale in das Basisband. Sie bildet eine austauschbare Schnittstelle zwischen der Basisbandplatine, auf welcher die eigentliche Regelung erfolgt, und den Hochfrequenzsystemen, die Leistungsverstärker und Resonatoren umfassen.

Die Transformation zwischen Basisband und Hochfrequenzband erfolgt mittels Quadraturamplitudenmodulation (QAM). Realisiert ist dieses in kommerziell erhältlichen mikroelektronischen Bausteinen. Sie sind auf hochfrequenzgeeignetem Platinenmaterial zu einer Schaltung verlötet. Der Signalaustausch mit der Basisbandplatine erfolgt analog.

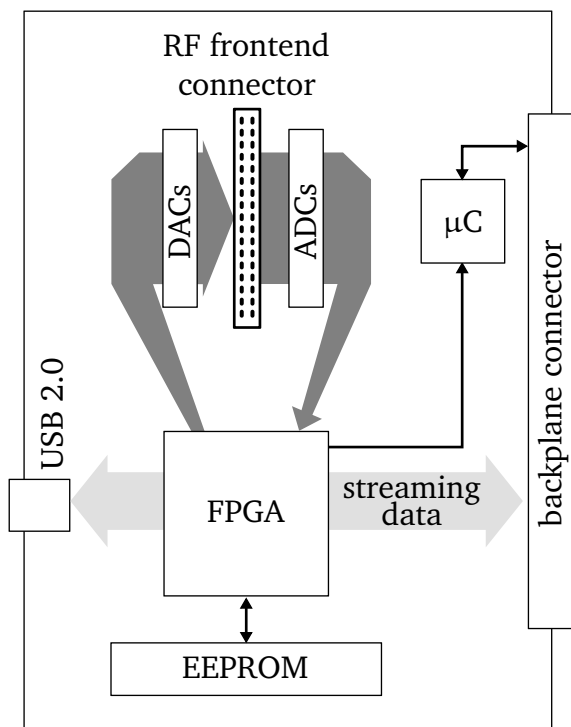


Abb. 2.2.: Schematischer Aufbau der Basisbandplatine. Die Hochfrequenzplatine ist über den *RF frontend connector* angebunden. ADCs wandeln die Signale in eine digitale Darstellung um. Im FPGA werden die Korrekturen berechnet und die entsprechenden Signale nach der Rückwandlung durch die DACs an die Hochfrequenzplatine weitergegeben. Die Regler können über einen Mikrocontroller überwacht und gesteuert werden. Der im FPGA verarbeitete Datenstrom kann zwischen den Berechnungsschritten dupliziert und über einen USB-Port und den *backplane connector* auf die Busplatine ausgegeben werden. Die Konfiguration des FPGAs ist in einem EEPROM-Baustein gespeichert.

Die im Hochfrequenzsignalpfad eingesetzten Bausteine sind teilweise nur für schmale Frequenzbereiche geeignet. Daher ist dieses Modul in unterschiedlichen Ausführungen vorhanden (vgl. Abschnitt 2.6), während die Basisband-Signalverarbeitung universell einsetzbar ist und nur der programmierbare Regler für manche Anwendungen angepasst werden muss.

2.4. Basisbandplatine

Auf der Basisbandplatine ist die Regelung implementiert. Sie verarbeitet hierzu die von der Hochfrequenzplatine bereitgestellten niederfrequenten Analogsignale.

In Abbildung 2.2 ist der Aufbau der Basisbandplatine in größerem Detail gezeigt. Zentrale Komponente ist ein FPGA-Baustein. Er wird beim Einschalten automatisch aus dem EEPROM-Speicherbaustein (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) konfiguriert, d. h. die Logikgatter werden entsprechend der Programmierung verknüpft. Über Analog-Digital-Umsetzer (engl. *Analog-to-Digital Converter*, ADC) und Digital-Analog-Umsetzter (engl. *Digital-to-Analog Converter*, DAC) findet eine weitere Transformation der Signale in eine digitale

Darstellung statt. Die Abtastrate beträgt 1 MS/s und die Auflösung 18 bit. Berechnungen im FPGA werden durchgängig mit dieser Auflösung durchgeführt. Die Rückwandlung geschieht mit einer Auflösung von 16 bit.

Der im FPGA implementierte Regler ist durch Umprogrammierung veränderbar. So lassen sich mit einheitlichen Exemplaren dieser Platinen unterschiedliche Regler realisieren, z. B. solche die optimiert sind auf normalleitende oder alternativ auf supraleitende Resonatoren. Die Zwischenergebnisse der einzelnen Berechnungsschritte werden in Speicherblöcken kurzzeitig gesammelt. Sie können dann als Datenströme über eine USB-2.0-Schnittstelle direkt ausgelesen werden oder über eine Busplatine von einem Konzentratormodul für mehrere Regelkreise gesammelt zur Verfügung gestellt werden.

Ein Mikrocontroller dient zur Überwachung und Steuerung der Regler. Er ist zur Kommunikation mit anderen Geräten mit einer CAN-Bus-Anbindung ausgestattet. Im Betrieb können die Verstärkungsfaktoren/Zeitkonstanten der Regler sowie die für die Kalibrierung verwendeten Parameter eingestellt werden. Zusätzlich kann eine Reihe von allgemeinen Größen, wie z. B. die Höhe der Versorgungsspannung oder die Version der aktiven Firmware, ausgelesen werden. Außerhalb des Regelungsbetriebs ist der Mikrocontroller für das Einspielen einer neuen FPGA-Konfiguration über den CAN-Bus geeignet.

Eine weitere Aufgabe des Mikrocontrollers stellt die Steuerung der Abstimmmechanismen der Beschleunigungsstrukturen dar. Die Platine bietet keine unmittelbar für die Ansteuerung der unterschiedlichen Aktuatoren geeigneten Ausgänge. Stattdessen werden die für den jeweiligen Abstimmmechanismus erforderlichen Signale von separaten Netzteilen erzeugt. Diese werden vom Mikrocontroller der jeweiligen Regelungsplatine über den CAN-Bus gesteuert.

2.5. Erweiterung um weitere Kanäle

Dieser Abschnitt beschreibt die Erweiterung der Hochfrequenzelektronik, um zusätzliche Kanäle zur Digitalisierung von Phasen- und Amplitudeninformationen der Signale der Phasenmonitore bereitzustellen. Die Phasenmonitore waren ursprünglich für zerstörungsfreie Strom- und transversale Positionsmessungen vorgesehen worden [41, 42]. Die Auswertung der Signale dieser Monitore erfolgte in den letzten Jahren nicht. Insbesondere in [18] wurde die Relevanz der Messung von Strahlphasen demonstriert. Zuletzt wurde ein Hochfrequenzmonitor eigens für die Strahlführung zwischen Injektorkryostat und Injektorbogen entwickelt [43]. Dieser ist insbesondere für eine aktive Phasenregelung des

Injektorbeschleunigers auf höherer Ebene vorgesehen [24]. Die im Folgenden beschriebene Erweiterung der Eingangskanäle der Hochfrequenzregelung um sechzehn weitere Kanäle ermöglicht die gleichzeitige Auswertung der Phasen- und Amplitudensignale aller Phasenmonitore. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden alle für die Integration in das Kontrollsystem relevanten Aufgaben abgeschlossen. Die ganzheitliche Inbetriebnahme, einschließlich der Kalibrierung der einzelnen Phasenmonitore erfolgt derzeit in [24].

2.5.1. Elektronik

Die im Rahmen von [16] entwickelte digitale Hochfrequenzregelungselektronik, war in der Vergangenheit wiederholt in provisorischen Aufbauten zur erfolgreichen Auswertung der Signale der Phasenmonitore verwendet worden. Daher musste keine neue Elektronik entwickelt, sondern lediglich zusätzliche Exemplare der bestehenden Serien gefertigt und in das bestehende System integriert werden. Somit sind diese Module zwischen den beiden Systemen austauschbar und es müssen weniger unterschiedliche Platinen als Ersatz vorgehalten werden.

Die zusätzlichen Platinen sind in einem wassergekühltem Schrank eingebaut, um eine temperaturstabile Betriebsumgebung zu erhalten. Im Schrank der Hochfrequenzregelung sind ein Referenzoszillator, ein PC zur Steuerung und Netzteile, die die Abstimmmechanismen der supraleitenden Beschleunigerstrukturen versorgen. Letztere sind natürlich nur für den Betrieb von aktiven Resonatoren nötig und konnten bei diesem Neuaufbau entfallen. Das Referenzsignal wird vom gleichen Oszillator bezogen (vgl. Abschnitt 2.5.2) und der vorhandene PC übernimmt die Steuerung und Überwachung der zusätzlichen Elektronik (vgl. Abschnitt 2.5.3).

2.5.2. Referenzphasensignal

Der Betrieb eines weiteren Satzes von Hochfrequenzmodulen erfordert die Versorgung derselben mit einem Referenzphasensignal, um neben einer Amplituden- auch die Phasenmessung zu ermöglichen. Zweckmäßigerweise wird dieses aus dem Referenzsignal der bestehenden Elektronik abgeleitet. Dieses Vorgehen stellt sicher, dass sich das Phasenrauschen des einzelnen Referenzoszillators auf die gesamte Hochfrequenzelektronik gleichermaßen auswirkt. Somit kann es bei Vergleichsmessungen zwischen unterschiedlichen Signalpfaden nicht in Erscheinung treten. Die an der Verteilung des Referenzsignals vorgenommenen Änderungen, welche zum Betrieb eines weiteren Satzes von Hochfrequenzmodulen erforderlich waren, sind in Anhang C beschrieben.

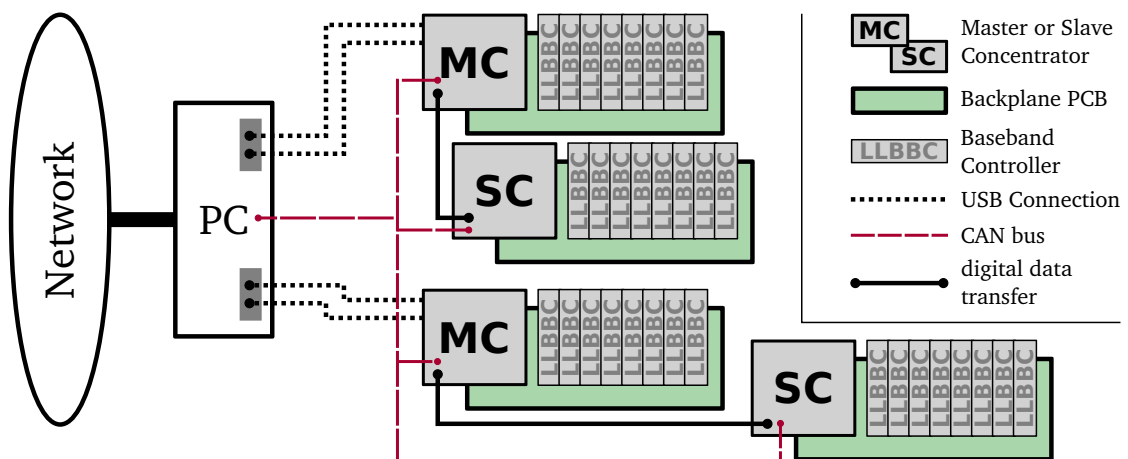


Abb. 2.3.: Ein lokaler Kontrollsystem-PC macht die Messdaten der Hochfrequenzregelung im Netzwerk verfügbar. Digitalisierte Signalverläufe werden kontinuierlich über USB eingelesen. Hierzu werden die Signale der Basisbandplatten (LLBBC) zweier Baugruppenträger von je zwei Konzentratormodulen gesammelt und auf je zwei USB-Schnittstellen bereitgestellt. Dabei fungiert je eine Konzentrator als *Master* (MC). Er überträgt neben den Signalen der direkt verbundenen Basisbandplatten auch die durch den *Slave*-Konzentrators (SC) gesammelten Signale.

2.5.3. Modifikationen am Kontrollsystem

Die oben beschriebenen Erweiterungen der Hochfrequenzelektronik erforderten auch die entsprechende Erweiterung des Kontrollsystems. Die Steuerung der neuen Elektronikmodule erfolgt über den CAN-Bus. Dieser wird vom verwendeten Beschleunigerkontrollsystem schon unterstützt (vgl. [16]) und kommt auch in anderen Bereichen des Beschleunigers zur Steuerung vieler Einzelgeräte zum Einsatz. Eine Einbindung war daher unkompliziert möglich. Für die neue Elektronik musste lediglich ein zusätzliches CAN-Bus-Segment an den vorhandenen Computer der Hochfrequenzregelung angeschlossen werden.

Die eigentlichen Signaldaten der *Hochfrequenzregelungselektronik* und der *Phasenmonitorelektronik* werden hingegen über jeweils ein *Konzentrator* modul gesammelt und über insgesamt vier USB-Schnittstellen zur Verfügung gestellt (vgl. Abb. 2.3). Während in [16] hierfür zwar ein entsprechendes Softwaremodul entwickelt worden war, musste dieses für die Auslese von mehr als einem Konzentrator modul erweitert werden, um weiterhin einen einzelnen PC verwenden zu können. Einzelheiten zu den vorgenommenen Änderungen sind in Anhang B wiedergegeben. Die übergeordnete Weiterentwicklung des EPICS-basierten Beschleunigerkontrollsystems ist Thema von Teil II der vorliegenden Arbeit.

2.6. Einsetzbarkeit für andere Anwendungen

Im Rahmen von [37] wurden die analogen Basisbandplatinen der alten Hochfrequenzregelung des S-DALINAC erstmals mittels geeigneter Adapterplatinen mit den Hochfrequenzmodulen der neuen Hochfrequenzregelung betrieben. Somit konnten trotz zunehmender Defekte an den alten Hochfrequenzmodulen, die Regelkreise einsatzbereit gehalten werden. Darüber hinaus wurde Betriebserfahrung mit den neuen Komponente gewonnen. Ebenfalls vor Inbetriebnahme des Gesamtsystems konnten diese Module für die Aufnahme von Phasenmonitorsignalen eingesetzt werden [18]. Seit 2011 ist ausschließlich die neue digitale Hochfrequenzregelung am S-DALINAC zum Betrieb der Hochfrequenzregelschleifen in Verwendung [16]. Für die Inbetriebnahme des neuen normalleitenden Injektors [17] wurde dabei auch ein 6-GHz-Regelkreis aufgebaut [44].

Zur Anwendung an anderen Beschleunigungsstrukturen wurden zwei Projekte durchgeführt. Im Rahmen von [45] wurde eine neue Hochfrequenzplatine entwickelt und Modifikationen an der FPGA-Konfiguration vorgenommen, um einen gepulsten Betrieb am Teststand des Protonenlinacs bei FAIR zu ermöglichen. In der vorliegenden Arbeit ist in Kapitel 4 der erfolgreiche Test der digitalen Hochfrequenzregelung unter Einsatz dieser Platine an einem 160-MHz-Viertelwellenresonator am ALPI-Beschleuniger beschrieben. Die durch die unterschiedlichen Prototypen oder Serienvarianten von Hochfrequenzplatinen zugänglichen Frequenzbereiche sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

Tab. 2.1.: Auswahl von Varianten der Hochfrequenzplatinen, welche im Rahmen unterschiedlicher Abschlussarbeiten [37, 16, 44, 45] entwickelt wurden. Die Frequenzbereiche wurden aus den Datenblättern der einzelnen Komponenten ermittelt und stellen nicht die tatsächlich getesteten Bereiche dar.

Bezeichnung	Frequenzbereich	Bausteine		
		Amp.-Detektor	Demod.	Mod.
HF-ADL5385	(50 - 375) MHz	ADL-5500	ADL-5387	ADL-5385
HF-ADL5370	(800 - 1000) MHz	ADL-5500	AD-8347	ADL-5370
HF-ADL5375D	(1100 - 1450) MHz	ADL-5500	ADL-5380	ADL-5375
HF-ADL5374	(3000 MHz)	ADL-5500	AD-8347	ADL-5374
HF-ADL5375C	(2825 - 3700) MHz	ADL-5500	ADL-5380	ADL-5375
HF-ADL5375B	(5500 - 6500) MHz	ADL-5500	ADL-5380	ADL-5375

3. Piezoelektrische Frequenzsteller

Die Beschleunigungsstrukturen des S-DALINAC werden in einer sogenannte *selbsterregten Schleife* betrieben. Hierbei wird durch eine schwach an den Resonator gekoppelte Antenne ein kleiner Teil der Energie des Wechselfeldes ausgekoppelt. Das so gewonnene Hochfrequenzsignal wird nach einer Verstärkung über eine stark gekoppelte Antenne wieder in den Resonator eingebracht. Die Schleifenverstärkung muss dabei größer oder gleich eins sein. Gleichzeitig muss die elektrische Weglänge der gesamten Schleife ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein. Eine so betriebene *selbsterregte Schleife* lässt den Resonator immer auf seiner Eigenfrequenz schwingen. Während des initialen Einschwingvorgangs einer Beschleunigungsstruktur ist dies durchaus erwünscht, um überhaupt ein Anschwingen zu erreichen. Für die Beschleunigung des Elektronenstrahls ist dagegen die Anpassung der Resonanzfrequenz an die Repetitionsfrequenz der einzelnen Elektronenpakete (Bunche) erforderlich.

Die Beschleunigungsstrukturen sind als gekoppelte Resonatoren ausgeführt. Die meisten bestehen aus 20 elliptischen Zellen. Im Injektorkryostaten kommen jeweils eine 5-zellige und einer 2-zellige Struktur zum Einsatz. In Systemen aus gekoppelten Resonatoren, können sie unterschiedliche Resonanzen ausbilden. Zur Beschleunigung der Elektronen wird die sogenannte π -Mode verwendet. Bei ihr beträgt der Phasenversatz zwischen zwei Zellen genau π . Die Einstellung der Resonanzfrequenz dieser Mode erfolgt in mehreren Schritten. Der erste Schritt ist Teil der Fertigungsverfahren der Beschleunigungsstrukturen. Er hat eine Resonanzfrequenz bei Raumtemperatur von ca. 5 MHz unterhalb der späteren Betriebsfrequenz zum Ziel [46]. Der zweite Schritt erfolgt beim Einbau der fertigen Beschleunigungsstruktur in den Abstimmrahmen. Hierbei wird zuerst bei Raumtemperatur und Normaldruck im Innern der Struktur die Frequenz so eingestellt, dass sie später nach dem Herstellen des Vakuums und dem Abkühlen auf Betriebstemperatur die gewünschte Resonanzfrequenz mit einer Genauigkeit von wenigen 100 kHz aufweist. Der dritte Schritt zur Einstellung der Resonanzfrequenz erfolgt im evakuierten Zustand bei 2 K. Die Beschleunigungsstruktur ist hierzu in einem Rahmen eingespannt. Über diesen lässt sich ihre Länge verändern. Die resultierende Stauchung, bzw. Streckung führt zu einer Veränderung der radialen Ausdehnung, die ihrerseits die Frequenz verändert. Eine grobe Einstellung ist über einen von einem Gleichstrommotor angetriebenen Hebelmechanismus möglich. Diese Einstellung erfolgt in der Regel einmalig nach dem Abkühlen der Beschleunigungsstrukturen und erreicht eine Annäherung an die gewünschte

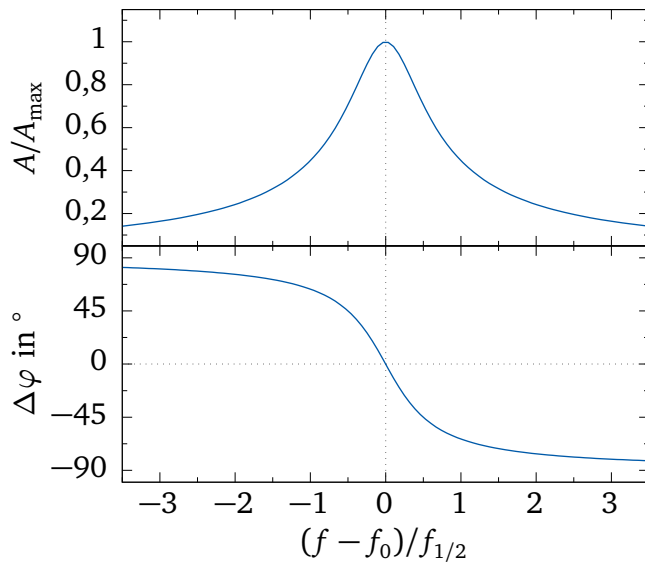


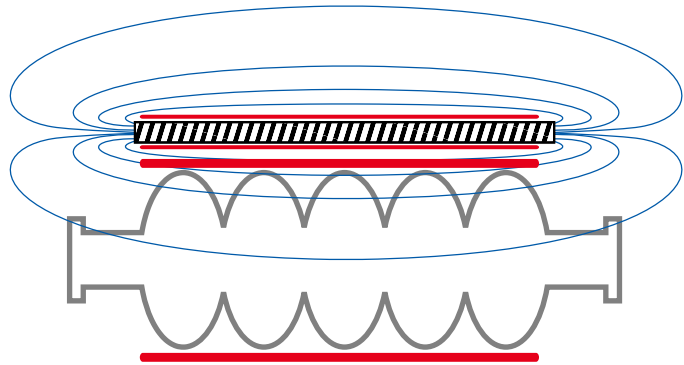
Abb. 3.1.: Übertragungsverhalten eines Resonators, nahe der Resonanzfrequenz. Die durch den Resonator verursachte Phasenverschiebung sei bei Anregung mit der Resonanzfrequenz gerade $\Delta\varphi = 0$. Ist die Resonanzfrequenz momentan ungleich der Betriebsfrequenz, so wird eine Phasendifferenz $\Delta\varphi$ ungleich 0 gemessen. Die so gewonnene Information über die Richtung der Verstimmung ermöglicht eine Eigenfrequenzregelung.

Frequenz von einigen 10 Hz bis wenigen 100 Hz. Während des aktiven Betriebs einer Beschleunigungsstruktur wird deren Resonanzfrequenz kontinuierlich durch eine Eigenfrequenzregelung auf der Betriebsfrequenz des Beschleunigers gehalten. Die Abweichung von der Sollfrequenz wird durch Messung der integrierten Phasenabweichung durch die Elektronik der Hochfrequenzregelung ermittelt (vgl. Abbildung 3.1 und [16]). Dabei geschieht die Regelung mit einer Zeitkonstanten von $\geq 0,1$ s, um die Anregung mechanischer Resonanzen der vielzelligen Strukturen zu vermeiden. Die Geschwindigkeit ist dennoch mehr als hinreichend um den Einfluss des schwankenden Kryostatdrucks auszugleichen. Die Resonanzfrequenz entspricht daher nur im zeitlichen Mittel der Sollfrequenz. Schnellere Störungen werden rein elektrisch durch Variation der Phase und Amplitude des zum Resonator vorlaufenden Hochfrequenzsignals ausgeglichen. Abweichungen der Resonanzfrequenz von der Sollfrequenz führen dabei zu einem Leistungsanstieg dieses Signals. Dieser überschreitet – abhängig von den genauen Verhältnissen, d. h. zum Beispiel momentaner Strahlstrom, Koppelfaktor und Güte der betrachteten Struktur – typischerweise bei einigen 10 Hz Abweichung die zur Verfügung stehenden Leistungsreserven der Hochfrequenzverstärker [40]. Daher sind Abweichungen auf einige Hz bis wenige 10 Hz zu beschränken.

3.1. Vorteil piezoelektrischer Stellelemente

In [47] ist die mit den Beschleunigungsstrukturen des S-DALINAC maximal zu erreichende Güte mit $2,4 \cdot 10^9$ angegeben. Dies setzt eine maximale magnetische

Abb. 3.2.: Andeutung des durch das magnetostriktive Stellelement verursachten Feldes (blau). Die um das Stellelement und um die Beschleunigungsstruktur gewickelte magnetische Abschirmung ist ebenfalls angedeutet (rot).



Feldstärke von $4,2 \mu\text{T}$ beim Unterschreiten der kritischen Temperatur von Niob voraus. Da dieser Wert bereits vom Erdmagnetfeld übertroffen wird, muss eine geeignete Abschirmung vorgesehen werden. Erreicht werden kann eine solch geringe Feldstärke nur im neuen Injektorkryostatmodul, welches eine gegenüber den herkömmlichen Modulen verbesserte magnetische Abschirmung bietet [46]. Neben dieser Abschirmung äußerer Felder muss insbesondere während des Übergangs von der normalleitenden zur supraleitenden Phase die Erzeugung von Magnetfeldern im Innern des Heliumtanks vermieden werden. Daher dürfen die in der Vergangenheit ausschließlich eingesetzten magnetostriktiven Aktuatoren der Frequenzsteller zu diesem Zeitpunkt nicht betrieben werden. Dies kann durch feststehende Betriebsprozeduren erreicht werden. Problematischer ist ein Ausbleiben der Entmagnetisierung der magnetostriktiven Elemente vor dem Aufwärmen des Beschleunigerkryostaten. In diesem Fall bleibt der Nickelkern magnetisiert. Da diese Elemente einen Strom von 2 A über einen sehr dünnen Draht ($\varnothing = 0,128 \text{ mm}$) transportieren, besteht beim Versuch der Entmagnetisierung bei Raumtemperatur das Risiko eines Schadens durch Überhitzung. Eine Behebung gelingt daher nur dann sicher, wenn ein zusätzlicher Kaltfahrzyklus zur Entmagnetisierung durchgeführt und anschließend nach einem erneuten Aufwärmen, der Beschleuniger nochmals kaltgefahren wird. Der Zeitaufwand hierfür beträgt ca. eine Woche.

Das schwerwiegendste Problem tritt im Regelbetrieb der supraleitenden Resonatoren auf. Dabei ist der Feinstellmechanismus kontinuierlich aktiv. In dieser Situation kann die Oberfläche des Resonators kurzzeitig normalleitend werden [47]. Beim Wiedereintritt in die supraleitende Phase wird dann das momentan herrschende Feld an Störstellen des Materials *eingefroren* und es kommt zu einer Verringerung der Güte. Abbildung 3.2 skizziert die Lage des Feinstellaktuators in Relation zur Beschleunigungsstruktur. Der qualitative Verlauf der durch ein magnetostriktives Element verursachten Feldlinien ist ebenfalls angedeutet. Es ist erkennbar, dass die um das Stellelement und die Beschleunigungsstruktur gewickelte magnetische

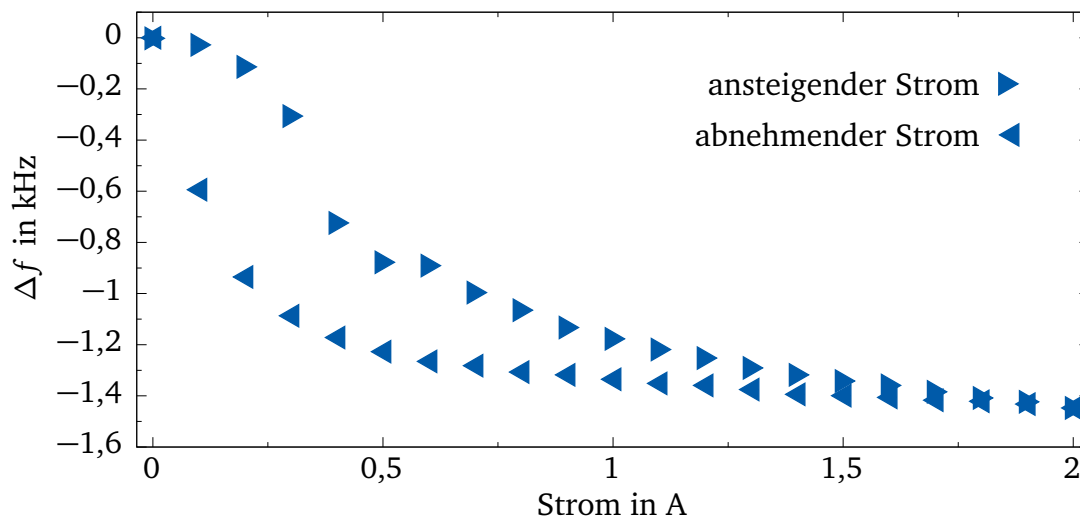


Abb. 3.3.: Kennlinie eines durch ein magnetostruktives Element angetriebenen Frequenzstellers. Die Messunsicherheiten sind kleiner als die Symbolgröße.

Abschirmung den gezeigten Feldlinienverlauf kaum beeinflussen kann, da sie weitgehend parallel zueinander verlaufen. Die eigentlich notwendige Abschirmung an den Stirnseiten ist aufgrund mechanischer Randbedingungen nicht möglich. Die bevorzugte Lösung ist daher der Verzicht auf Stellelemente, welche Magnetfelder verursachen.

Der Einsatz von piezoelektrischen Elementen war aus dem genannten Grund bereits zu Zeiten der Inbetriebnahme des S-DALINAC angestrebt worden. Die verwendeten Modelle boten jedoch aufgrund der niedrigen Temperatur nur durch den Betrieb mit Spannungen von bis zu 1000 V einen hinreichenden Hub. Wiederkehrenden elektrischen Durchschlägen im Innern des Kryostaten wurde schließlich durch eine Umstellung auf die noch heute eingesetzten magnetostruktiven Elemente begegnet. Abbildung 3.3 zeigt die Kennlinie eines Frequenzstellers, der durch ein solches Element angetrieben wird. Der Abstimmbereich beträgt ca. 1,5 kHz. Dieser Wert sollte von einem alternativen Antrieb mindestens erreicht werden. Der folgende Abschnitt beschreibt einen auf modernen, kommerziell erhältlichen piezoelektrischen Elementen basierenden Antrieb.

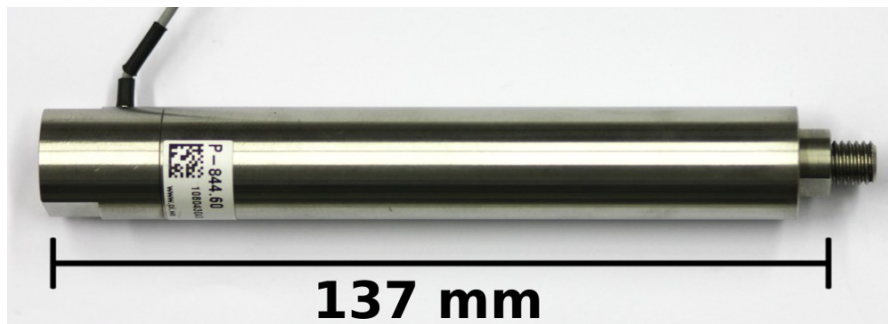


Abb. 3.4.: Fotografie eines der verwendeten Piezoaktuatoren. An einem Frequenzsteller einer 20-zelligen Beschleunigungsstruktur des S-DALINAC kommen drei dieser Aktuatore zum Einsatz.

3.2. Aufbau der piezoelektrischen Frequenzsteller

Die Eignung der zum Aufbau der Frequenzsteller verwendeten piezoelektrischen Aktuatore (Physik Instrumente, P-844.60) wurde in [47] zunächst im vertikalen Badkryostaten geprüft. Es wurde gezeigt, dass bereits ein einzelnes, 137 mm langes Element die geforderte Frequenzverstellung von ca. 1 kHz herbeiführen kann, ohne eine Spannung von 100 V überschreiten zu müssen. Aufgrund dieser geringen Baulänge ist auch der Einsatz an der fünfzelligen Beschleunigungsstruktur im Injektorkryostaten möglich.

Ebenfalls in [47] wurde ein für den Betrieb am Beschleuniger konstruierter Frequenzsteller untersucht. Dieser ist so konzipiert, dass er als mechanischer Eins-zu-eins-Ersatz für ein magnetostriktives Element dienen kann. Er enthält drei der genannten piezoelektrischen Elemente, um die Ausfallsicherheit zu erhöhen. Beim Test einer neu gefertigten Beschleunigungsstruktur in einem neuen Kryostatmodul wurde ein solcher Frequenzsteller in horizontaler Lage in einem vollständigen Abstimmrahmen getestet [46, 47]. Auch hier wurde ein Abstimmungsbereich von ca. 1 kHz unter Verwendung eines einzelnen piezoelektrischen Elements erreicht.

Ein Exemplar des eingesetzten Piezoelements ist in Abbildung 3.4 gezeigt. Tabelle 3.1 fasst die technischen Daten zusammen. Abbildung 3.5 zeigt die Kennlinien eines derzeit im Hauptbeschleuniger verbauten Abstimmrahmen, der von drei piezoelektrischen Elementen angetrieben wird. Der geforderte Abstimmungsbereich wird bereits bei Verwendung eines einzelnen Elements übertroffen. Die eigentlich zum Herstellen einer Redundanz zusätzlich verbauten piezoelektrischen Elemente können parallel mit dem ersten Element geschaltet werden. Tabelle 3.2 zeigt den Vergleich der beiden unterschiedlich angetriebenen Abstimmrahmen sowie

Tab. 3.1.: Eigenschaften des am Frequenzsteller eingesetzten Piezoaktuators [48].

Typ	P-844.60
Durchmesser	19,8 mm
Länge	137 mm
Stellweg (300 K)	90 μm
Stellweg (2 K) [47]	0,05 μm
Steifigkeit	38 N/ μm
Druck- / Zugbelastbarkeit	3000 N / 700 N
Elektrische Kapazität	36 μF
Zulässiger Betriebsspannungsbereich	-20 V bis +120 V
Resonanzfrequenz f_0 , unbelastet	5,5 kHz
spezifizierter Temperaturbereich	-40 °C bis 80 °C

Tab. 3.2.: Vergleich der beiden unterschiedlich angetriebenen Abstimmrahmen. Die maximale Umkehrspanne charakterisiert die Hysterese. Beginnend mit Spannung/Strom Null werde eine bestimmte Frequenz über den aufsteigenden Ast der Hysterese angefahren. Wird die gleiche Frequenz ausgehend von der maximalen Spannung/Strom angefahren, so muss ein verschiedener Spannungs-/Stromwert eingestellt werden. Die Differenz wird als Umkehrspanne bezeichnet.

	1 Piezoel.	3 Piezoel.	magn. Element
Reichweite f_{range}	(1750 \pm 30) Hz	(5515 \pm 30) Hz	(1445 \pm 30) Hz
Max. Umkehrspanne	3,5 V	5,3 V	0,63 A
Linearität			
Achsenabschnitt	-33 Hz	-177 Hz	-284 Hz
Steigung	18 Hz/V	56 Hz/V	-702 Hz/A
Std.-Abw. der Residuen	3 Hz	14 Hz	135 Hz

zwischen dem Betrieb eines einzelnen piezoelektrischen Elements und drei parallel geschalteten. Im letzteren Fall verdreifacht sich die Reichweite tatsächlich. Die Hysterese ist bei piezoelektrisch angetriebenen Abstimmrahmen deutlich schwächer ausgeprägt als bei dem magnetostriktiven Element. Die Linearität ist ebenfalls bei piezoelektrisch angetriebenen Abstimmrahmen gegenüber dem magnetostriktiven Element deutlich verbessert. Alle in den Abbildungen 3.3 und 3.5 gezeigten Kennlinien wurden an den im Beschleunigerkryostaten eingebauten Beschleunigungsstrukturen aufgenommen und geben die im regulären Praxiseinsatz erreichbare Leistung wieder.

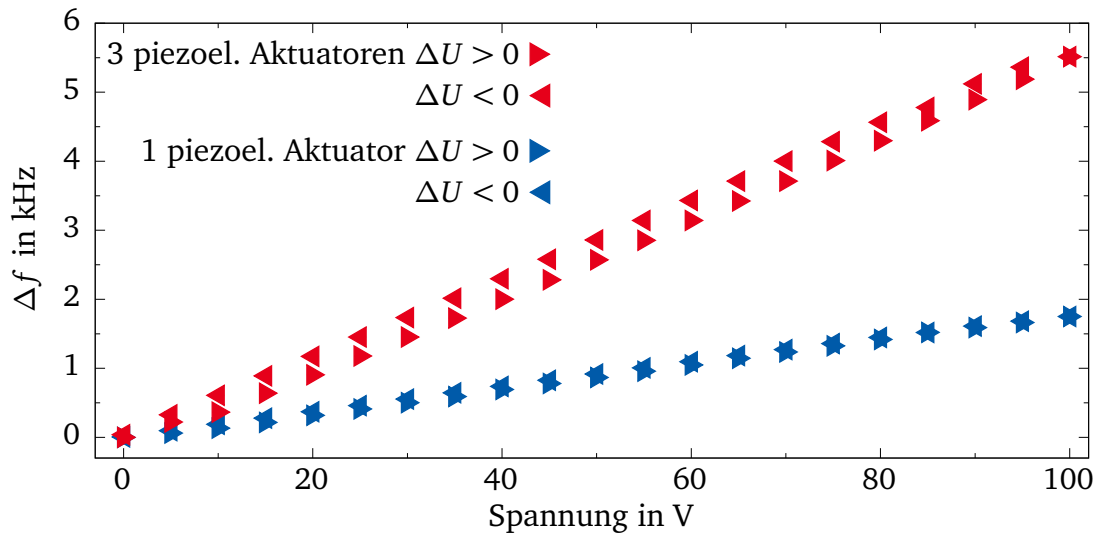


Abb. 3.5.: Kennlinie eines durch ein piezoelektrisches Element angetriebenen Frequenzstellers. Die Messunsicherheiten sind kleiner als die Symbolgröße.

3.3. Integration in den Regelbetrieb

Die herkömmlichen magnetostriktiven Stellelemente werden von stromgeregelten, über CAN-Bus gesteuerten Kleinnetzteilen einer Serie mit maximalen Ausgangsstrom von 10 A versorgt. Der Abstimmbereich von typischerweise 1 kHz lässt sich durch das Einstellen von Strömen zwischen 0 A und 2 A erreichen, also 20 % des maximalen Stellbereichs. Im Regelbetrieb werden von der Elektronik der digitalen Hochfrequenzregelung Steuerkommandos über CAN-Bus an die Netzteile gesendet.

Die nun verwendeten piezoelektrischen Aktuatoren sind für positive Spannungen von bis zu 120 V spezifiziert. Zwar gab es bereits unterschiedliche Typen von CAN-Bus-gesteuerten, spannungsgeregelten Netzteilen, allerdings nicht mit Eignung für diesen Spannungsbereich. Dennoch konnte der erste Test zur Integration der piezoelektrischen Aktuatoren in die Regelschleife des Frequenzstellers im Rahmen von [47] mit einem solchen Netzteil erfolgen. Hierzu wurde ein sogenanntes CPS-08-Netzteil mit einer maximalen Ausgangsspannung von 40 V verwendet. Um keine Veränderung an der Programmierung des Mikrocontrollers der digitalen Hochfrequenzregelung vornehmen zu müssen, wurde dieser Stellbereich ebenfalls nur zu 20 % genutzt. Die so erzeugte Spannung von maximal 8 V wurde von einem dedizierten Piezoverstärker auf den Bereich 0 V – 80 V verstärkt. Der verwendete Testaufbau ist in Abbildung 3.6 gezeigt.

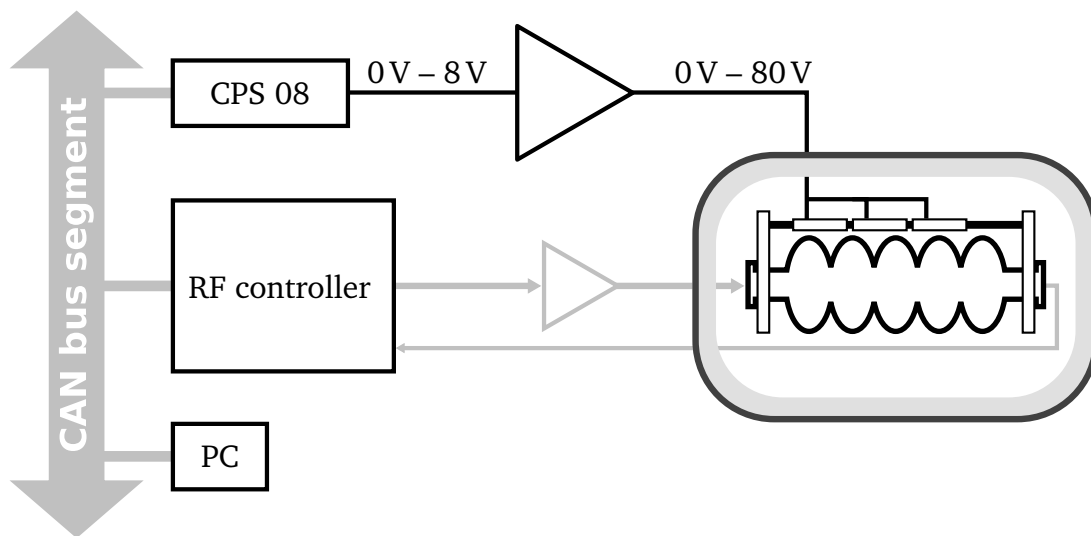


Abb. 3.6.: Der in [47] verwendete Aufbau zur Demonstration der Eignung der piezoelektrischen Aktuatoren. Die schematisch dargestellte Beschleunigungsstruktur wurde in einer *selbsterregten Schleife* betrieben. Die Eigenfrequenzregelung erfolgte über ein spannungsgeregeltes Netzteil (CPS 08) und einen nachgeschalteten, kommerziellen Piezoverstärker. Die Steuerung des Netzteils durch die Regelungselektronik erfolgt über CAN-Bus. Die Firmware des digitalen Teils der Hochfrequenzregelungselektronik wurde ohne Modifikation verwendet. So ergab sich ein maximaler Spannungshub von 0 V – 8 V bzw. nach Verstärkung 0 V – 80 V.

Zwei Nachteile dieses Aufbaus sollten bei der Integration der piezoelektrischen Antriebe in den Regelbetrieb vermieden werden. Zum einen wird die maximale zulässige Spannung und somit auch der Hub der verwendeten piezoelektrischen Elemente bei weitem nicht ausgenutzt. Zum anderen erfordert diese Lösung gegenüber den Regelschleifen mit magnetostriktiven Frequenzstellern jeweils einen zusätzlichen Piezoverstärker. Die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall des Gesamtsystems steigt in erster Näherung mit der Anzahl der einzelnen Geräte. Die Entwicklung eines geeigneten Netzteils, welches die entsprechende Spannung direkt erzeugen kann, vermeidet die genannten Nachteile.

3.3.1. Anforderungen an das Netzteil

Die Umrüstung der Abstimmrahmen der einzelnen Kavitäten auf piezoelektrische Antriebe soll schrittweise über einen längeren Zeitraum erfolgen. Der Grund hierfür ist, dass die Umrüstung die arbeitsaufwendige Öffnung der einzelnen Kryostatmodule bedeutet. Daher soll die Umstellung eines Moduls immer dann

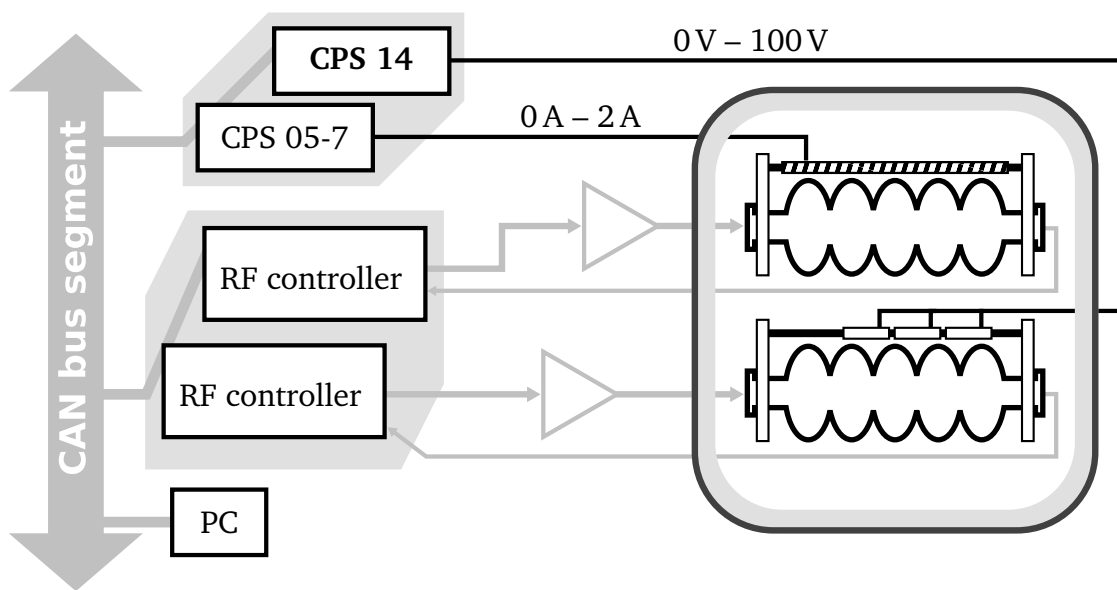


Abb. 3.7.: Betrieb unterschiedlicher Aktuatoren in den Eigenfrequenzregelschleifen mehrerer Beschleunigungsstrukturen. Die obere Struktur wird von einem magnetostriktiven Element abgestimmt, die untere durch ein piezoelektrisches Element. Es kommen entsprechend stromgeregelte (CPS 05-7) oder spannungsgeregelte Netzteile (CPS 14) zum Einsatz. Letztere wurden eigens für diesen Einsatzzweck entwickelt und benötigen keinen zusätzlichen Verstärker. Die beiden Netzteiltypen an einer Busplatine betrieben werden. Somit ist eine schrittweise Umstellung der einzelnen Eigenfrequenzregelkreise einfach durchführbar.

erfolgen, wenn es aus anderen Gründen ohnehin geöffnet werden muss. Kompatibilität mit der bestehenden Busplatine wurde als unerlässlich betrachtet. Ein stromgeregeltes Netzteil kann somit einfach durch ein spannungsgeregeltes Netzteil ersetzt werden. Auf diese Weise kann die Umrüstung ohne Installation einer Parallelinfrastruktur erfolgen (vgl. Abbildung 3.7). Die Kompatibilität des Befehlssatzes ist ebenfalls erstrebenswert, da so die Integration in das Beschleunigerkontrollsystem vereinfacht wird.

Die elektrische Leistungsfähigkeit lässt sich anhand Tabelle 3.1 ermitteln. Der Spannungshub sollte den zulässigen Spannungsbereich der piezoelektrischen Elemente weitgehend ausnutzen. Die Bereitstellung einer gewissen geregelten Ausgangsspannung erfordert intern eine höhere Spannung für die Versorgung der Endstufe des Netzteils. Diese Versorgungsspannung wurde mit 120 V so gewählt, dass auch im Fehlerfall, das heißt wenn diese Spannung direkt am Ausgang des Netzteils anliegt, die piezoelektrischen Elemente nicht beschädigt werden können. Der reguläre Stellbereich ist mit 0 V – 102,4 V vorgesehen.

Eine hinreichende Stromstärke ist nötig, um die elektrischen Kapazitäten der piezoelektrischen Aktuatoren in angemessener Zeit umladen zu können. Der Abstimmbereich sollte sich in 1 – 2 Sekunden vollständig durchfahren lassen. Dies soll auch bei einer Parallelschaltung aller drei piezoelektrischen Elemente eines Abstimmelements möglich sein. Die Eigenfrequenzregelung benötigt allgemein nur sehr geringe Fahrtgeschwindigkeiten (wenige 10 Hz/s). Für den Operator bedeutet eine schnelle Reaktion des Frequenzstellers bei manueller Betätigung jedoch eine Erleichterung gegenüber niedrigen Fahrtgeschwindigkeiten. So kann er beispielsweise während der Inbetriebnahme eines Regelkreises schnell testen, ob die Resonanzfrequenz der Beschleunigungsstruktur in der Reichweite des Frequenzstellers liegt oder nicht. Bei einer Kapazität von 36 µF pro Element (vgl. Tabelle 3.1) ergibt sich eine Stromstärke von

$$I_{1s} = \frac{100\text{ V} \cdot (3 \cdot 36\text{ }\mu\text{F})}{1\text{ s}} \approx 10\text{ mA}$$

Zusammengefasst lauten die Anforderungen somit:

- Kompatibilität mit der bestehenden Busplatine
- Weitgehende Kompatibilität des Befehlssatzes mit dem der vorhandenen Netzteile
- 0 V – 100 V Spannungshub (unipolar)
- 10 mA Stromstärke, um die Kapazität der verwendeten piezoelektrischen Elemente handhaben zu können

3.3.2. Umsetzung

Abbildung 3.8 zeigt den schematischen Aufbau und eine Fotografie des in der Elektronikwerkstatt des Instituts für Kernphysik entwickelten Netzteils. Die etablierte Busplatine stellt eine Primärspannung von 24 V zur Verfügung. Sie wird zunächst durch vier potentialgetrennte Gleichspannungskonverter auf konstante $4 \times 30\text{ V} = 120\text{ V}$ gewandelt. Der eigentliche Sollwert wird digital durch einen Mikrocontroller vorgegeben. Ein DAC wandelt ihn in eine niedrige Spannung um (0 V – 4,096 V). Der zur Verstärkung dieser Spannung eingesetzte Hochspannungs-Operationsverstärker wird mit der erwähnten konstanten Spannung von 120 V versorgt. Durch den Verstärkungsfaktor von 25 ergibt sich ein Arbeitsbereich von 0 V bis +102,4 V für den variablen Ausgang des Netzteils.

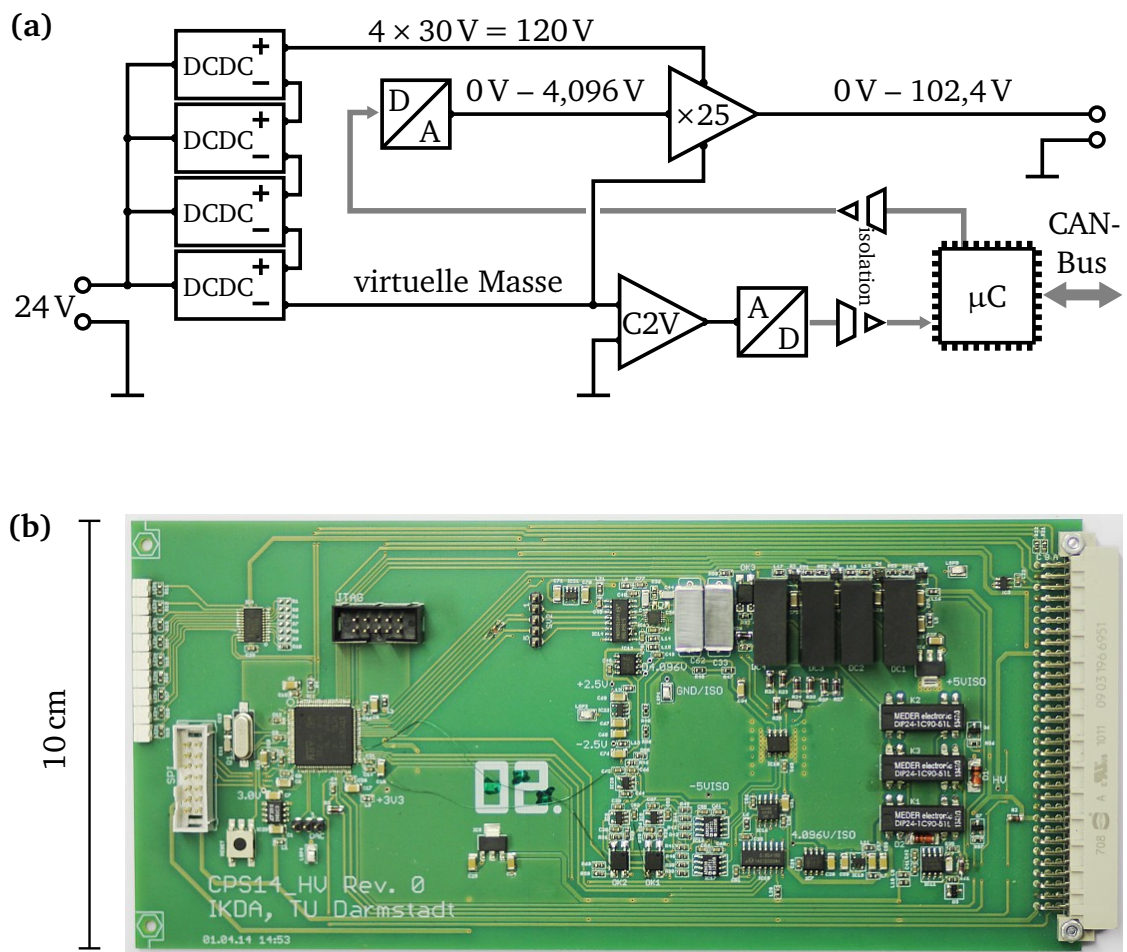


Abb. 3.8.: Vereinfachte, schematische Darstellung (a) und Fotografie (b) des Netzteils, das im Rahmen dieser Arbeit für den Betrieb des piezoelektrischen Aktuatoren entwickelt wurde. Die aus der Primärspannung erzeugte Spannung von 120 V versorgt einen Operationsverstärker. Dieser verstärkt das von einem DAC erzeugte Analogsignal auf den Bereich 0 V – 102,4 V. Eine präzise Strommessung ist über einen Transimpedanzverstärker (C2V) realisiert. Er gibt eine dem über seine Eingänge fließenden Strom proportionale Spannung aus. Diese wird über einen ADC gewandelt und kann über den Mikrocontroller zur Diagnose ausgelesen werden. Der Verbinder für die Busplatine (auf der fotografischen Darstellung rechts) ist kompatibel zu jenem der für die magnetostriktiven Aktuatoren eingesetzten Netzteile.

Eine präzise Strommessung wird durch die Erzeugung einer *virtuellen Masse* ermöglicht. Ein Transimpedanzverstärker erzeugt hierzu an einem seiner Eingänge ein Potential, welches zwar sehr genau mit dem Massepotential der restlichen Schaltung übereinstimmt, aber galvanisch von diesem getrennt ist. Diese *virtuelle Masse* dient dem gesamten Hochspannungsteil der Platine als Bezugspotential. Fließt nun ein Strom aus dem potentialgetrennten Teil der Schaltung ab, z. B. über den mit dem piezoelektrischen Element verbundenen Ausgang, muss er über den Transimpedanzverstärker vom eigentlichen Massepotential nachfließen. Der Verstärker hält das Potential der *virtuellen Masse* auch bei wechselnden Stromflüssen quasi konstant und stellt andererseits eine dem Strom proportionale Spannung bereit. Diese wird digitalisiert und kann über einen Mikrocontroller ausgelesen werden.

Die *virtuelle Masse* ermöglicht auch die Umschaltung des unipolar konstruierten Netzteils auf den Bereich 0 V bis $-102,4\text{ V}$ (diese Option wird für den Betrieb der Frequenzsteller nicht benötigt). Hierzu wird das normalerweise ausgegebene Hochspannungspotential nicht mit dem Ausgang verbunden, sondern über den Transimpedanzverstärker dem Potential der eigentlichen Schaltungsmasse angeglichen. Als Ausgangspotential dient dann jenes Potential, welches zuvor als *virtuelle Masse* diente. Diese Umschaltung erfolgt über Relais und kann dementsprechend nicht übergangslos erfolgen. Abbildung 3.8a stellt diese Möglichkeit aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dar.

3.3.3. Einsatz am Beschleuniger

Strahlzeiten wurden seit Juni 2014 mit piezoelektrisch angetriebenen Frequenzstellern durchgeführt. Zwei dieser Aktuatoren wurden damals in die Abstimmrahmen der ersten beiden Beschleunigungsstrukturen des Hauptbeschleunigers eingebaut. Auch die Inbetriebnahme des in [46] entwickelten Kryostatmoduls geschah mit derart ausgestatteten Frequenzstellern. Eine Einschränkung der Funktion der piezoelektrischen Aktuatoren wurde nach über zehnmaligem Abkühlen und Aufwärmen des Beschleunigerkryostaten nicht beobachtet.

Abbildung 3.9 zeigt 30-stündige Zeitreihen von den Regelabweichungen von Amplitude und Phase der zweiten Beschleunigungsstruktur des Hauptbeschleunigers. Die Konfiguration der Hochfrequenzregelung und der Verstärker gleicht der im Strahlbetrieb Verwendeten. Aufgrund der zu dieser Zeit durchgeführten Umbauarbeiten am Beschleuniger, erfolgte der Test ohne Elektronenstrahl. Die Aktivität des Frequenzstellers kann anhand der ebenfalls aufgetragenen Spannung, mit welcher der Piezoaktor betrieben wurde, beurteilt werden. Zum Vergleich ist außerdem die Abweichung des Kryostatdrucks von seinem Mittelwert gezeigt.

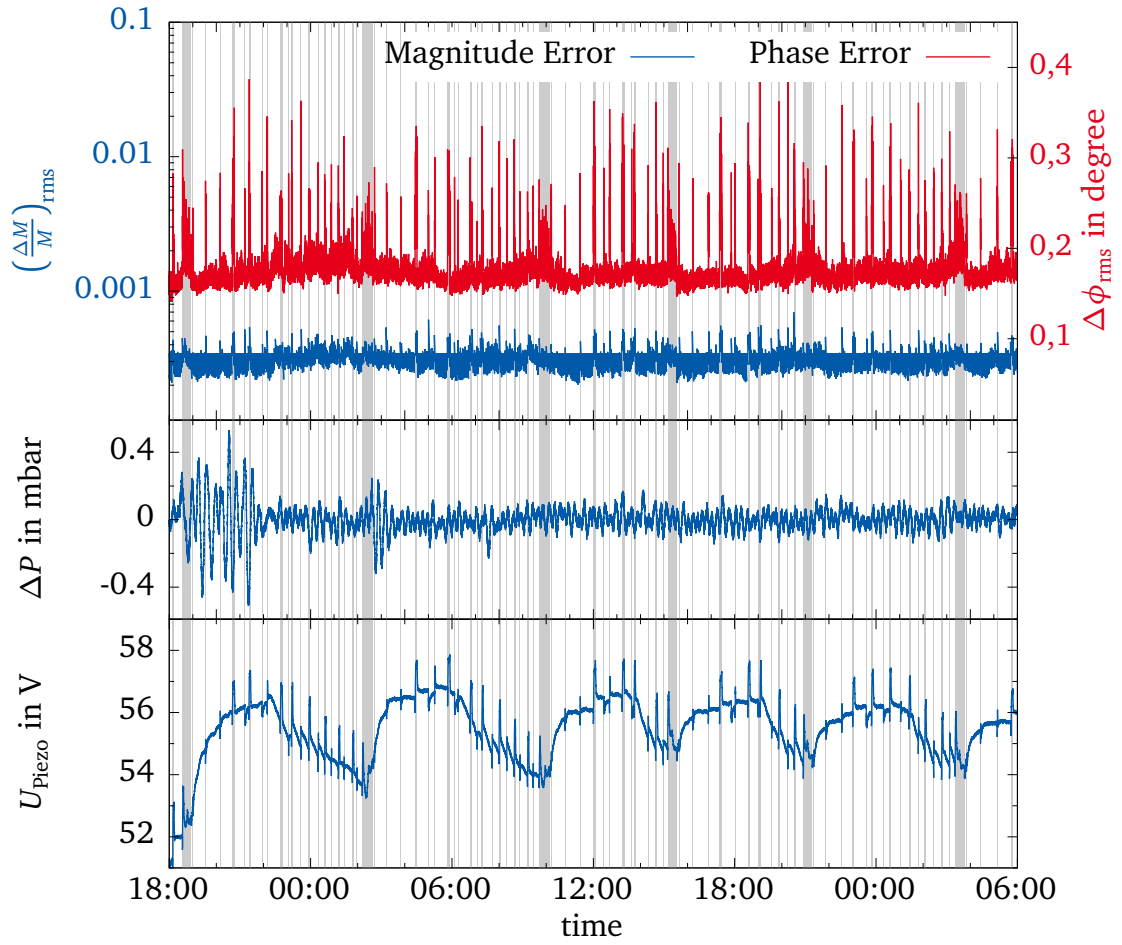


Abb. 3.9.: Stabilität einer durch einen mit piezoelektrische Aktuatoren ausgestatteten Abstimmrahmen auf Sollfrequenz gehaltenen Beschleunigungsstruktur. Die Regelabweichungen von Phase und Amplitude (oben) konnten im hier gezeigten Zeitraum von 30 Stunden ohne zwischenzeitlichen Ausfall auf $(\Delta\phi)_{\text{rms}} < 0,4^\circ$ und $(\Delta M/M)_{\text{rms}} < 6 \cdot 10^{-4}$ begrenzt werden. Diese Werte übersteigen die in [16] als Anforderungen genannten Werte teilweise ($(\Delta\phi)_{\text{rms}} < 0,7^\circ$ und $(\Delta M/M)_{\text{rms}} < 8 \cdot 10^{-5}$, entsprechend einer relativen RMS-Abweichung der Strahlenergie von $1 \cdot 10^{-4}$), entsprechen jedoch den Werten die typischerweise auch mit magnetostriktiven Elementen erreicht werden. Die stärkeren Schwankungen des Kryostatdrucks (Mitte) zu Beginn des gezeigten Zeitraums, haben keine sichtbaren Auswirkungen auf diese Regelabweichungen. Die insbesondere bei der Regelabweichung der Phase auffälligen Spitzen werden von Erschütterungen, durch das Einsetzen der regelmäßigen Befüllung der kryogenen Abschirmung der Kryostatmodule verursacht (Zeiten des Befüllens sind grau hinterlegt).

Die Regelabweichungen können durchgehend unter $(\Delta\phi)_{\text{rms}} < 0,4^\circ$, respektive $(\Delta M/M)_{\text{rms}} < 6 \cdot 10^{-4}$ gehalten werden. Demnach können die in [16] genannten Anforderungen teilweise erfüllt werden ($(\Delta\phi)_{\text{rms}} < 0,7^\circ$ und $(\Delta M/M)_{\text{rms}} < 8 \cdot 10^{-5}$, entsprechend einer relativen RMS-Abweichung der Strahlenergie von $1 \cdot 10^{-4}$). Jedoch entsprechen die erzielten Abweichungen den typischen Werten, die an Beschleunigungsstrukturen mit magnetostriktiv angetriebenen Frequenzstellern erreicht werden. Die größten Regelabweichungen werden dabei während der wiederkehrenden Flüssigstickstoffbefüllung des Wärmestrahlungsschildes beobachtet. Weitere Bemerkungen hierzu sind in Anhang A zu finden. Normalerweise erfolgt dieses Nachfüllen etwa einmal täglich für eine Stunde. Das hier gezeigte kurze Intervall war auf eine zu ungenaue Einstellung der Füllstandsmessung zurückzuführen.

3.3.4. Vergleich des dynamischen Verhaltens

Neben der Reichweite der unterschiedlich angetriebenen Frequenzabstimmer kann auch die Geschwindigkeit, mit welcher diese durchfahren werden kann, verglichen werden. Hierzu wurde eine analoge PLL (*Phase-Locked-Loop*) zum Betrieb einer einzelnen Beschleunigungsstruktur gemäß [49] aufgebaut. Ein spannungsgesteuerter Oszillator (engl. *Voltage Controlled Oscillator*, VCO) erzeugt in diesem Aufbau immer ein Signal dessen Frequenz mit der momentanen Resonanzfrequenz der Beschleunigungsstruktur übereinstimmt. Das niederfrequente Spannungssignal, welches den VCO steuert, wird dabei durch den Vergleich von vorlaufendem Signal und einem aus der Beschleunigungsstruktur ausgekoppelten Testsignal gewonnen. Sie lässt sich mit einem Oszilloskop aufzeichnen, während der Abstimmmechanismus durch seinen vollen Abstimbereich gefahren wird, und erlaubt somit eine Charakterisierung des dynamischen Verhaltens. Die Messungen erfolgten dabei bei niedrigen Hochfrequenzfeldstärken.

Abbildung 3.10 zeigt das dynamische Verhalten je eines piezoelektrisch und eines magnetostriktiv angetriebenen Frequenzstellers. Wie bereits eine Betrachtung von Abbildung 3.3 erwarten ließ, verhielt sich das magnetostriktive Element auch zeitlich nicht linear. Der durchstimbare Bereich wurde mit maximal 20 kHz/s in etwa 0,5 s durchfahren. Der betrachtete piezoelektrische Frequenzsteller veränderte die Resonanzfrequenz unmittelbar entsprechend der Vorgabe durch das Netzteil. Dadurch war auch die Zeitabhängigkeit der Resonanzfrequenz linear. Das Durchfahren des gesamten Bereichs dauerte ca. 1,4 s bei einer Geschwindigkeit von 3,6 kHz/s.

Für die Stabilisierung des Betriebs von bereits eingeregelter Beschleunigungsstrukturen sind beide Antriebe gleichermaßen geeignet. Die durch Druckkände-

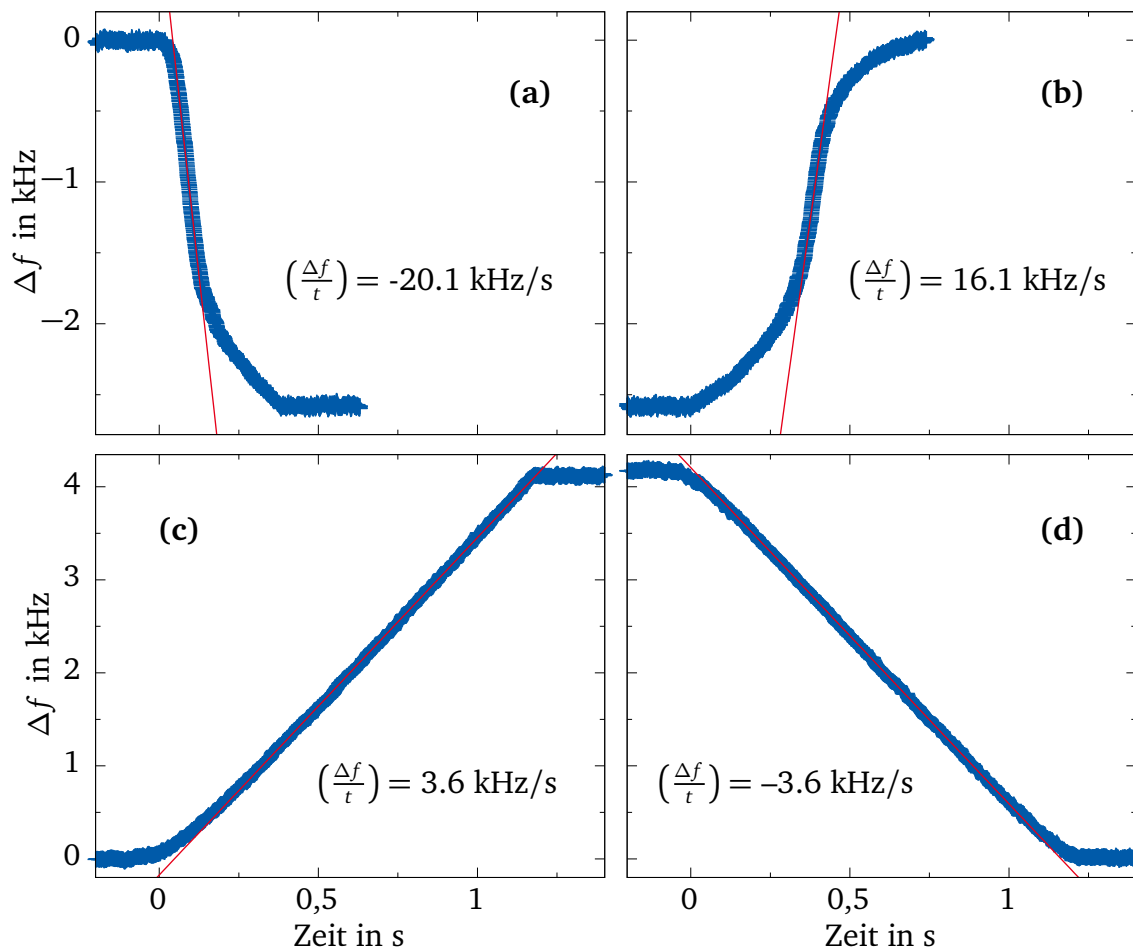


Abb. 3.10.: Dynamisches Verhalten unterschiedlich angetriebener Frequenzsteller. Die angegebenen Steigungen entsprechen denen der eingezeichneten Geraden. Das betrachtete magnetostruktive Element durchfährt seinen Abstimmbereich in weniger als 0,5 s bei ansteigendem Strom **(a)** und in weniger als 0,8 s bei abfallendem Strom **(b)**. Sie verändern die Resonanzfrequenz der Struktur um bis zu 20,1 kHz/s. Der piezoelektrische Frequenzsteller erreicht aufgrund der Strombegrenzung des entwickelten Netzteils lediglich 3,6 kHz/s und benötigt ca. 1,3 s bei an- **(c)** und absteigender **(d)** Spannung. Für den Regelbetrieb an sich stellt dies kein Problem dar. Die Inbetriebnahme eines Regelkreises kann hingegen für den Operateur anspruchsvoller sein. Dieser muss die Resonanzfrequenz der Beschleunigungsstruktur durch manuelle Einstellung der Piezospaltung mit der Frequenz des Referenzoszillators bis auf einige 10 Hz Differenz in Übereinstimmung bringen.

rungen verursachten Schwankungen der Resonanzfrequenzen ließen sich auch mit deutlich langsameren Frequenzstellern (in den meisten Situationen genügen wenige 10 Hz/s) noch gut ausgleichen.

Einen Sonderfall stellt dagegen die Inbetriebnahme eines Regelkreises dar. Die Hochfrequenzregelung muss den Resonator zunächst anschwingen lassen, bevor sich bestimmen lässt, ob die momentane Resonanzfrequenz ober- oder unterhalb jener des Referenzoszillators liegt. Erst dann erzeugt der Eigenfrequenzregler ein sinnvolles Signal und der Frequenzsteller reagiert entsprechend. Im Falle der magnetostriktiv angetriebenen Frequenzsteller lässt sich ein einmalig eingestellter Regelkreis meist per Knopfdruck wieder einschalten. Bei piezoelektrisch angetriebenen Frequenzstellern kann dies dagegen zusätzliche Eingriffe durch den Operateur erfordern. Dieser muss die Resonanzfrequenz der Beschleunigungsstruktur durch manuelle Einstellung der Piezospannung mit der Frequenz des Referenzoszillators bis auf einige 10 Hz Differenz in Übereinstimmung bringen. Anschließend kann er die Eigenfrequenzregelung aktivieren und die Regelschleife bleibt auch ohne weitere Eingriffe stabil. Grund für die beschriebene Problematik ist die geringere Fahrtgeschwindigkeit der Frequenzsteller. Das Netzteil kann der schnellen Vorgabe des Eigenfrequenzreglers nicht folgen, sondern läuft ihr nach. Das System neigt dadurch bei großen Anfangsabweichungen zu Schwingungen. Dieses Verhalten wurde insbesondere mit der zunächst gewählten Fahrtgeschwindigkeit von ca. 800 Hz/s beobachtet. Modifikationen der Netzteile erlaubten die Steigerung auf die in Abbildung 3.10 gezeigte Geschwindigkeit von 3,6 kHz/s. Ob weitere Maßnahmen erforderlich sind, muss in zukünftigen Strahlzeiten ermittelt werden. Neben der Erhöhung der maximalen Stromstärke des neuen Netzteils wäre auch die Vergrößerung der Zeitkonstante des Eigenfrequenzreglers ein Mittel zur Reduzierung der beschriebenen Schwingungsneigung.

3.4. Fazit

Die in [47] als tauglich befundenen piezoelektrischen Aktuatoren wurden erfolgreich in den Regelbetrieb überführt. Sie wurden an zwei Beschleunigungsstrukturen des Hauptbeschleunigers in allen Strahlzeiten seit Juni 2014 ohne Störungen eingesetzt. Die damit erreichten Regelabweichungen entsprechen den bisher mit magnetostriktiven Elementen erzielten Abweichungen. Ein eigens entwickeltes spannungsgeregeltes Netzteil dient zur Versorgung der piezoelektrischen Elemente. Es erlaubt eine allmähliche Umstellung der bisher verwendeten magnetostriktiven Elemente auf piezoelektrische Elemente.

4. Test der digitalen Hochfrequenzregelung an einem 160-MHz-Viertelwellenresonator

Die in Kapitel 2 beschriebene digitale Hochfrequenzregelung führt die Signalverarbeitung in zwei elektronischen Modulen durch. Das Hochfrequenzmodul ist spezifisch für die Resonanzfrequenz des jeweiligen Resonators. Es transformiert die Signale durch Quadraturamplitudenmodulation (QAM) zwischen Basisband und dem jeweiligen Hochfrequenzband. Das Basisbandmodul ist auf einer eigenen Platine realisiert. Es implementiert den eigentlichen Regler.

In Abschnitt 2.6 war bereits auf die Möglichkeit der Anwendung der Hochfrequenzregelungselektronik des S-DALINAC bei anderen Betriebsfrequenzen hingewiesen worden. Dieses Kapitel stellt die Demonstration der Funktionalität bei niedrigen Frequenzen vor. In [45] war ein Hochfrequenzmodul für den Einsatz bei 325 MHz entwickelt worden. Es wurde nun bei 160 MHz eingesetzt.

Der folgende Abschnitt 4.1 beschreibt die Überprüfung der Hochfrequenzeigenschaften dieses Moduls. Die praktische Einsetzbarkeit in einer Regelschleife wurde am Ionenbeschleuniger ALPI (italienisch: *Acceleratore Lineare Per Ioni*) des *Laboratori Nazionali di Legnaro* (LNL, Legnaro, Italien) an supraleitenden Viertelwellenresonatoren (engl. *Quarter-Wave-Resonator*: QWR) demonstriert.

4.1. Hochfrequenzmodul

4.1.1. Spezifikation

Die Viertelwellenresonatoren des ALPI-Beschleunigers arbeiten bei Frequenzen von 80 MHz und 160 MHz [50]. Das in [45] entwickelte Hochfrequenzmodul¹ ist für den Frequenzbereich von etwa 100 MHz bis 375 MHz geeignet. Um ein vollständigeres Bild der Einsetzbarkeit dieses Moduls zu erhalten, wurden Messungen zur Charakterisierung bei den Frequenzen 80 MHz, 160 MHz, 320 MHz und 480 MHz durchgeführt. Zwar liegen die Frequenzen 80 MHz und 480 MHz bereits außerhalb des spezifizierten Bereichs einiger Komponenten, jedoch fällt deren Leistungsfähigkeit bei Abweichungen vom spezifizierten Frequenzbereich oft nur langsam ab. Wird die Verwendung des Amplitudendetektors vermieden,

¹HF-ADL-5385 rev. 2, vgl. Tabelle 2.1

bzw. eine verringerte Messgenauigkeit akzeptiert, so kann es ab 50 MHz eingesetzt werden. Die obere Grenze ist durch die Leistungsteiler bedingt. Diese sind für eine Frequenz von maximal 750 MHz spezifiziert. Da die auf diesem Hochfrequenzmodul eingesetzten Modulator- und Demodulatorbausteine eine gegenüber der Signalfrequenz verdoppelte Referenzsignalfrequenz erfordern, kann von uneingeschränkter Verwendbarkeit bis 375 MHz ausgegangen werden.

4.1.2. Charakterisierung des Hochfrequenzmoduls

Zur Charakterisierung des Hochfrequenzmoduls wurde das in [16] beschriebene Kalibrierungsverfahren in einer erweiterten Form eingesetzt. Zunächst wurden hierzu Signale unterschiedlicher Pegel gemessen, um die Amplitudenkennlinien zu erhalten. Anschließend dienten gegenüber dem Referenzsignal verstimmte Signale zur Bestimmung der Phasenkennlinie. Die Eignung des Modulatorbausteins wird durch die Fähigkeit der Unterdrückung von unerwünschten Signalanteilen im Ausgangssignal und die erzielbare Ausgangsleistung beurteilt.

Durch die Untersuchung soll die ganzheitliche Eignung des Hochfrequenzmoduls zur Amplituden- und Phasenmessung beurteilt werden, sowie die Fähigkeit Hochfrequenzsignale in hinreichender Qualität zu erzeugen.

Amplitudenmessung

Die Messung der Amplitude kann einerseits mit dem dedizierten Amplitudendetektor erfolgen oder über den Demodulator. Der Amplitudendetektorbaustein bietet laut Datenblatt eine hohe Langzeitstabilität. Er reagiert aber langsamer als der Demodulator [45]. In nicht-gepulsten Anwendungen wird der Amplitudendetektorbaustein bevorzugt.

In der Praxis liegt die in einer Regelschleife zu messende Leistung im Bereich -10 dBm bis $+10\text{ dBm}$. Um den Leistungsbereich zu ermitteln, in welchem die Bausteine verwendbar sind, wurden Kennlinien aufgenommen. Abbildung 4.1 zeigt die relativen Abweichungen von einer an die Daten angepassten Geraden. Im genannten Bereich weichen die Messwerte des Amplitudendetektors um $+4/-3\%$ ab. Die Abweichungen der vom Demodulator bestimmten Amplitudenwerte liegen in diesem Leistungsbereich innerhalb eines Bandes von $\pm 2\%$ um 0. Für die unten beschriebenen Tests in einer Regelschleife wurden dennoch die Messwerte des Amplitudendetektors verwendet, da ihm aufgrund von Herstellerangaben eine bessere Langzeitstabilität zugeschrieben wird. Die hier gezeigten Abweichungen

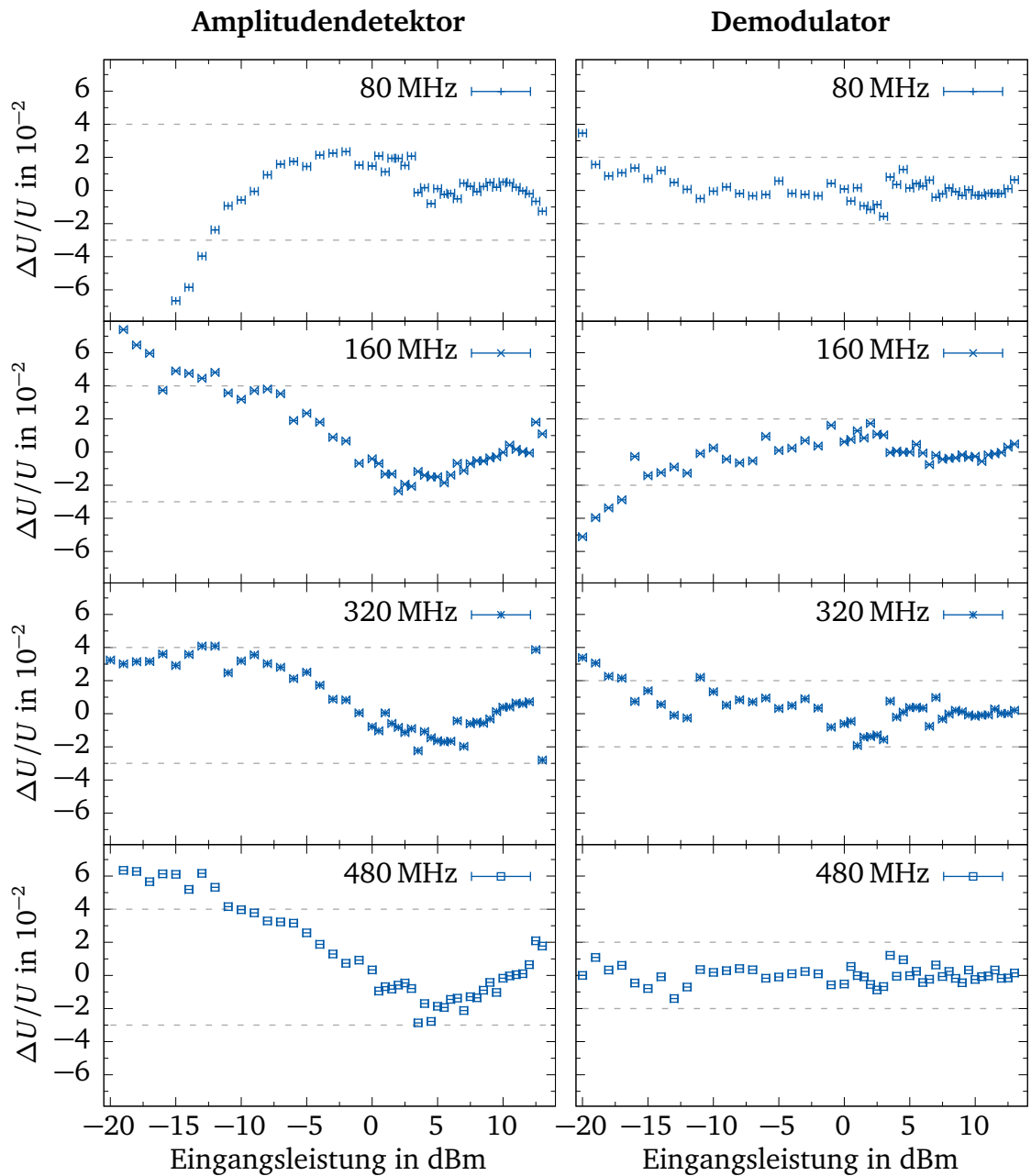


Abb. 4.1.: Charakterisierung der Amplitudenmessung durch Amplitudendetektorbaustein und Demodulator. Unsicherheiten sind in vertikaler Richtung nicht eingezeichnet, da deren Ausdehnung im Bereich der Strichstärke liegt. Aufgetragen sind die relativen Abweichungen der Spannungsverläufe von einer Geraden. Diese wurde durch eine Anpassung über den gesamten Bereich ermittelt.

der Kennlinien verdeutlichen lediglich die begrenzte Linearität der Amplitudenmessung. Auf die absolute Leistung kann anhand des Messwertes nur mit der angegebenen Genauigkeit einiger Prozent geschlossen werden. Die in einer geschlossenen Regelschleife erzielten relativen Regelabweichungen können deutlich geringer ausfallen, da hierbei nur eine kleine Umgebung um den gewählten Leistungspegel Einfluss hat.

Phasenmessung

Die Phasendetektion wurde mittels des in [45, 16] etablierten Verfahrens untersucht. Hierzu wird ein reines Sinussignal demoduliert, welches eine gegenüber der Frequenz des Referenzoszillators um 1 kHz erhöhte Frequenz aufweist. Die demodulierten und digitalisierten Signale werden über den FPGA für einige tausend Schwingungen, d. h. einige Sekunden, von einem Computer mitgeschrieben. Eine Anpassung einer Sinusfunktion mit den Freiheitsgraden *Amplitude*, *Frequenz*, *Phase* und *Offset* ermöglicht die Bestimmung der Abweichung zwischen tatsächlichem Phasenwinkel des Eingangssignals und des vom Demodulatorbaustein ermittelten Phasenwinkels.

Abbildung 4.2 zeigt die Auftragung der Differenz zwischen den gemessenen Phasenwinkeln und dem durch die angepasste Sinusfunktion vorgegebenen Winkel. Systematische Abweichungen der Phase überschreiten für verschiedene Betriebsfrequenzen nicht das vom Hersteller spezifizierte Band von $\pm 0,4^\circ$.

Signalausgabe

Nicht-ideale Eigenschaften von Modulatoren verursachen eine Verzerrung des auszugebenden Signals. So kann bei Modulierung eines reinen Sinussignals das Auftreten von Seitenbändern und dem Durchkoppeln der Trägerfrequenz beobachtet werden. Über den Abgleich der Gleichspannungsoffsets und der getrennt einstellbaren Verstärkungen im I- und Q-Signalfad lassen sich die unerwünschten Signalanteile teilweise unterdrücken. Diese Optimierung wird händisch unter kontinuierlicher Beobachtung des Signalspektrums durchgeführt. Ergebnisse solcher Abgleichvorgänge sind in Abbildung 4.3 zusammengefasst. Ein Durchkoppeln des Trägers kann durch den Abgleich praktisch vollständig unterbunden werden, die Seitenbänder sind um -40 dBc unterdrückt.

Weiterhin kann die Eignung der Schaltung für verschiedene Frequenzen anhand der Ausgangskennlinie beurteilt werden. Wie Abbildung 4.4 zeigt, ist die Funktionsfähigkeit für die betrachteten Frequenzen gegeben. Der Ausgang wird in einer

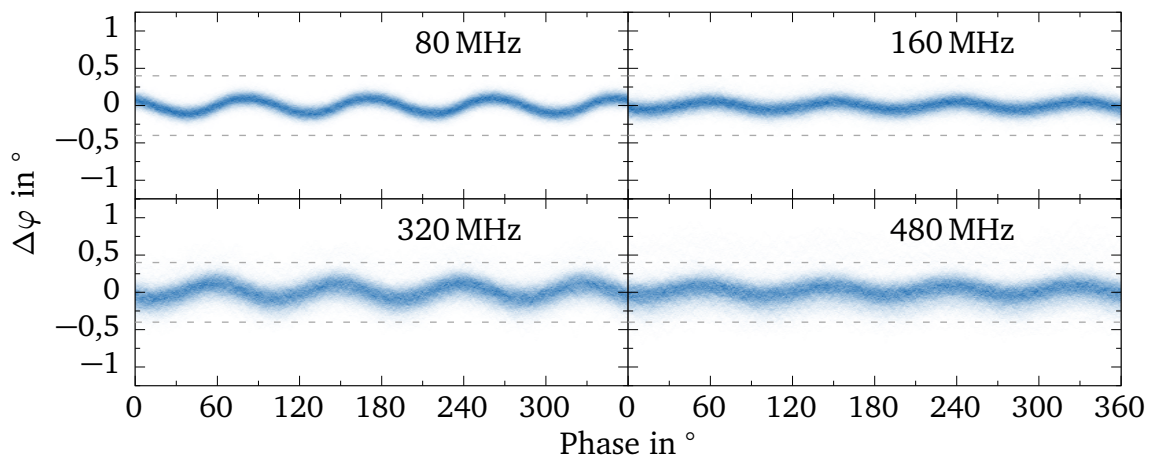


Abb. 4.2.: Systematische Fehler (als Oszillationen erkennbar) der Phasenmessung durch den Demodulator bei unterschiedlichen Frequenzen. Sie überschreiten nicht den vom Hersteller spezifizierten Bereich von $\pm 0,4^\circ$. Die diffuse Verbreiterung ist auf Rauschen der Elektronik zurückzuführen (vorwiegend auf das Phasenrauschen der verwendeten Hochfrequenzoszillatoren).

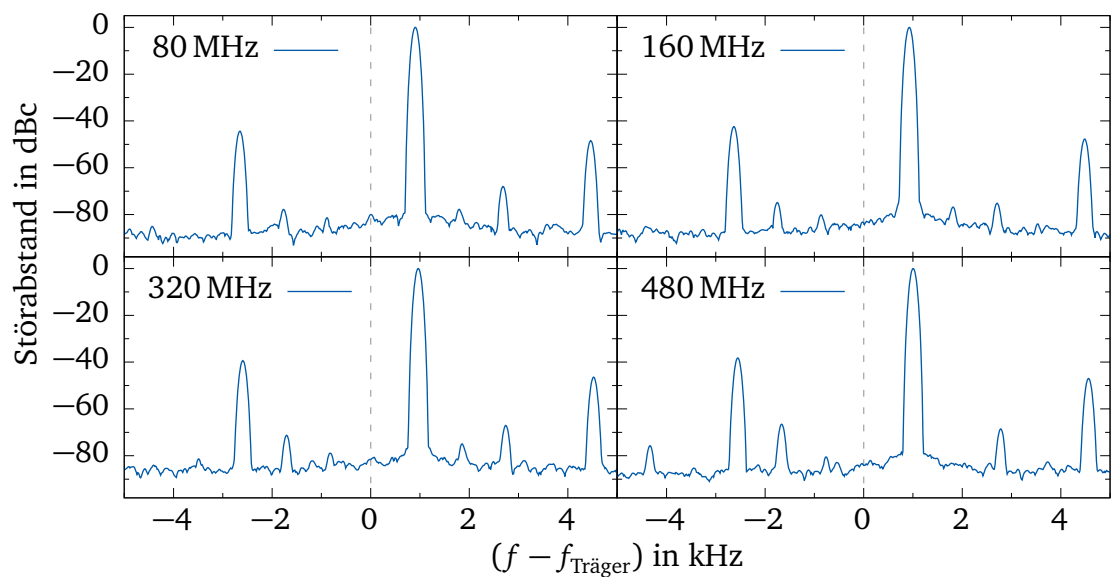


Abb. 4.3.: Spektren der Ausgangssignale des Hochfrequenzmoduls bei unterschiedlichen Betriebsfrequenzen. Gezeigt ist der Frequenzbereich um den Träger. Als Testsignal wurde ein 1-kHz-Sinus gewählt. Die Trägerunterdrückung gelingt in einem sehr hohen Maße. Andere Störsignale sind um mindestens -40 dBc unterdrückt.

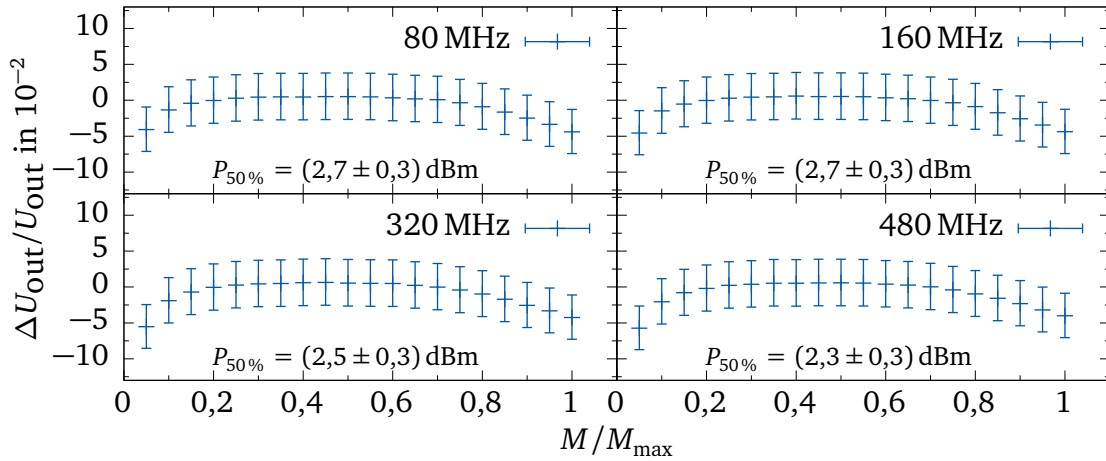


Abb. 4.4.: Amplitudenkennlinien des Modulators. Aufgetragen sind die relativen Abweichungen von einer Geraden, die durch eine Anpassung an den Bereich 0 % bis 80 % ermittelt wurde. Der Modulator weist in allen Fällen einen hinreichenden linearen Arbeitsbereich und Ausgangsleistung auf.

geschlossenen Regelschleife in einem mittleren Bereich betrieben (30 % – 70 %). Um nachgeschalteten Verstärkern einen ausreichenden Pegel bieten zu können, sollte der absolute Ausgangspegel des Modulators in diesem Bereich um 0 dBm liegen. Dies ist bei allen betrachteten Frequenzen der Fall. Die Linearität ist in diesem Bereich ebenfalls in hinreichendem Maße gegeben.

4.2. Regelung eines 160-MHz-Viertelwellenresonators

Mithilfe des untersuchten Hochfrequenzmoduls wurde eine Demonstration der Phasen- und Amplitudenregelung im Betriebsmodus der *selbsterregten Schleife* an einem 160-MHz-Viertelwellenresonator des ALPI-Beschleunigers durchgeführt.

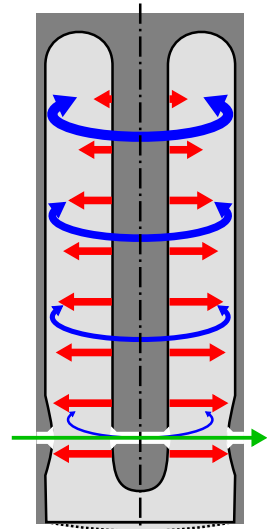
4.2.1. Die Viertelwellenresonatoren des ALPI-Beschleunigers

Der Test sollte an einer Medium- β -Viertelwellenresonator [50] mit einer Betriebsfrequenz von 160 MHz durchgeführt werden. Abbildung 4.5 zeigt eine schematische Darstellung eines solchen Resonators. Sie sind geometrisch von den Beschleunigungsstrukturen des S-DALINAC sehr verschieden. Sie werden jedoch auch im *continuous-wave*-Modus betrieben und weisen belastete Güten auf, die mit denen der supraleitenden Strukturen des S-DALINAC vergleichbar sind. Die

Abb. 4.5.: Schematische Schnittansicht eines Viertelwellenresonators. Der Hohlraum ist hell dargestellt. Die Struktur ist abgesehen von den Öffnungen für den Strahl rotations-symmetrisch. Sie ist aus Kupfer gefertigt und mit Niob gesputtert. Der Boden ist über einen schrittmotorgetriebenen Mechanismus verformbar und erlaubt die Abstimmung auf die gewünschte Resonanzfrequenz.

Elektrische Felder bilden sich zwischen dem zentralen Stempel und der Außenwand aus (rot). Das magnetische Feld, welches im Wechsel entsteht, ist in blau dargestellt. Der Strahl passiert die Struktur auf der grün eingezeichneten Achse.

Die Betriebstemperatur beträgt 4 K. Sie wird durch den Kontakt der Außenseite und des Inneren des Stempels mit verflüssigtem Helium erzielt.



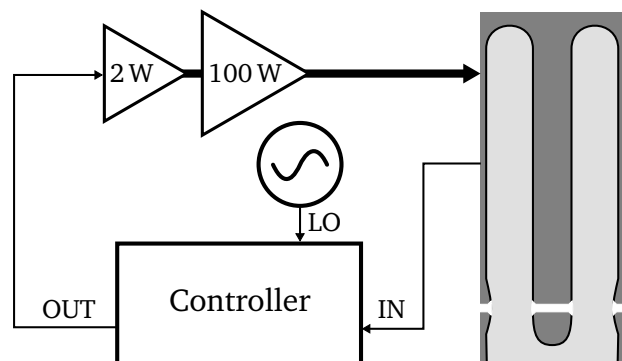
Betriebstemperatur beträgt 4 K und wird durch das den Resonator umgebende flüssige Helium bei Atmosphärendruck erreicht.

4.2.2. Messungen

Die im Folgenden beschriebene Eignungsprüfung wurde im April 2013 vorgenommen. Der Test erfolgte ohne Strahl. Die Feldstärke lag mit 4,1 MV/m jedoch in einem Bereich, welcher für Strahlbetrieb typisch ist.

Der Testaufbau ist in Abbildung 4.6 skizziert. Abbildung 4.7 zeigt die Auswertung eines etwa 60 s langen Ausschnitts der Daten, welche während eines Tests aufgenommen wurden. Die quadratischen Mittel (engl. *root mean square*, RMS) der Regelabweichungen von Phase und Amplitude wurden zunächst fouriertransformiert. Um die Beiträge einzelner Frequenzen zur Gesamtabweichung besser

Abb. 4.6.: Schematische Darstellung des Testaufbaus. Die Hochfrequenzleistung wird von den an diesem Resonator standardmäßig eingesetzten Halbleiterverstärkern bereitgestellt. Eine Ansteuerung des Abstimmmechanismus erfolgte aufgrund elektrischer Inkompatibilität nicht.



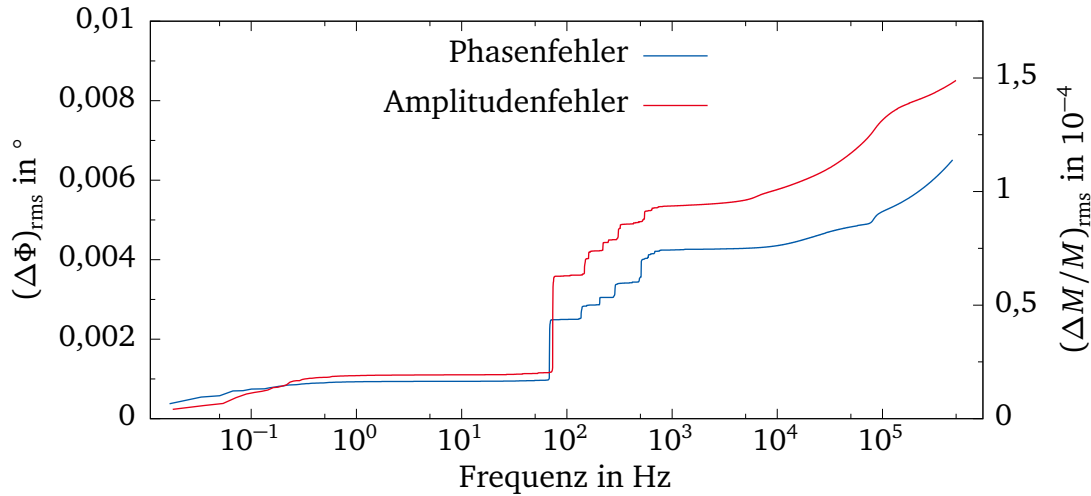


Abb. 4.7.: Integrierte Spektren der Regelabweichungen von Phase und Amplitude. Der 160-MHz-Viertelwellenresonator wurde bei einer Feldstärke von 4,1 MV/m betrieben. Der Abstimmmechanismus wurde nicht betätigt.

einschätzen zu können, wurden die Spektren von der minimalen erfassten Frequenz bis zu einer gewählten maximalen Frequenz integriert. Dargestellt sind die Auftragungen dieser Integrale über der oberen Integrationsgrenze. Die RMS-Regelabweichung der Amplitudenregelung lag unterhalb 0,015 %, jene für die Phase lag unter 0,01°. Dies liegt im Bereich der in [51] angestrebten Werte für diese Abweichungen. Die zu unterschreitende Phasenabweichung wird dort mit 0,1° und die relative Amplitudenabweichung mit 0,005 % – 0,05 % angegeben.

Die oben genannte Regelabweichung der Phase von 0,01° erfordert eine Kommentierung in zweierlei Hinsicht. Erstens beinhaltet diese Abweichung lediglich die Schwankungen um den lokalen Sollpunkt. Die absolute Abweichung von der vorgegebenen Phase ist größer. Sie wird von den oben diskutierten systematischen Fehler der Phasenmessung des Demodulators dominiert und liegt hier im Bereich weniger 0,1°. Zweitens führt der Demodulator die Phasenmessung anhand eines Referenzsignals durch. Dieses weist selbst ein Phasenrauschen auf. Die Regelung kann prinzipiell keine genauere Phasenstabilität bieten, als jene der Referenzsignalquelle. Anhand der lokalen Breite des in Abbildung 4.2 dargestellten Bandes für eine feste Eingangsphase, kann hierfür ebenfalls ein typischer Beitrag zur realen Abweichung von wenigen 0,1° angenommen werden. Der für die Charakterisierung der Phasenmessung verwendete Referenzoszillator war ein anderes Modell als jenes, welches für den Test am ALPI-Beschleuniger verwendet wurde. Dennoch hat der oben genannte Wert von 0,01° eine Bedeutung: Die unvermeidbare Abweichung aufgrund des Phasenrauschens des Referenzoszillators

wird durch die Regelungselektronik praktisch nicht vergrößert.

Phase und Amplitude eines 160-MHz-Viertelwellenresonator wurden unterbrechungsfrei über Zeiträume von einigen 10 Minuten stabilisiert. Längere Messzeiten wurden nicht realisiert, da die begrenzte Zeit für Variationen des Aufbaus genutzt wurde. Die von der Regelelektronik ermittelte mittlere quadratische Abweichung der Phase überstieg bei einer Betrachtung über solch lange Zeiträume $0,1^\circ$. Die Qualität der Amplitutenregelung war nicht beeinträchtigt. Grund hierfür war die fehlende Möglichkeit, den Abstimmmechanismus anzusteuern. Eine Möglichkeit ließ sich hierfür in der begrenzten Versuchszeit aufgrund der elektronischen Inkompatibilität nicht finden. Bei Zuhilfenahme des Abstimmmechanismus kann davon ausgegangen werden, dass die über einige 10 s demonstrierte Regelabweichung der Phase über beliebig lange Zeiträume eingehalten werden könnte.

4.2.3. Fazit

Es konnte demonstriert werden, dass die Regelung der Viertelwellenresonatoren ohne Anpassungen der Basisbandplatine möglich war. Lediglich die Verstärkungsfaktoren der Regler wurden im Betrieb optimiert, um die geringsten Phasen- und Amplitudenabweichungen zu erzielen. Unter Einsatz des für eine Frequenz von 160 MHz geeigneten Hochfrequenzmoduls konnten die oben gezeigten Ergebnisse innerhalb weniger Stunden Arbeitszeit erzielt werden. Die Regelabweichungen waren sehr gering. Sie konnten lediglich aufgrund der fehlenden elektronischen Kompatibilität zu dem verwendeten Abstimmmechanismus nicht dauerhaft eingehalten werden.

Die Signalverarbeitung durch die bestehende Regelungselektronik des ALPI-Beschleunigers geschah zum Zeitpunkt des beschriebenen Tests mit analoger Elektronik [52, 53]. Die für den S-DALINAC entwickelte digitale Hochfrequenzregelung wird am ALPI-Beschleuniger nicht zum Einsatz kommen. Inzwischen ist am LNL die Entwicklung einer eigenen FPGA-basierten Hochfrequenzregelungselektronik gestartet worden. Sie setzt digitale QAM ein und integriert eine Leistungsmessung der zum Resonator vorlaufenden und der von ihm reflektierten Hochfrequenzwelle [51]. Dennoch wurde im Rahmen dieser Arbeit die Eignung einer digitalen Regelungselektronik für den Betrieb der Resonatoren dieses Beschleunigers zum ersten Mal nachgewiesen. Auch wurde erstmals außerhalb des S-DALINAC eine supraleitende Beschleunigungsstruktur mit der am Institut der Kernphysik der TU Darmstadt entwickelten digitalen Hochfrequenzregelung betrieben. Darüber hinaus stellt diese Demonstration die Eignung der am S-DALINAC entwickelten digitalen Hochfrequenzregelung für verschiedene Frequenzbereiche unter Beweis.

Teil II.

Entwicklungen für das Beschleuniger-Kontrollsystem

5. Entstehung des EPICS-basierten Beschleunigerkontrollsystems

Im Folgenden wird das Software-Framework EPICS vorgestellt. Die vorangegangenen Entwicklungen des Kontrollsystems des S-DALINAC sollen, so weit erforderlich, geschildert werden. Weitere Darstellungen hierzu, welche verschiedene Zeiträume in unterschiedlicher Ausführlichkeit beschreiben, finden sich in [16, 54, 55].

5.1. Das EPICS-Software-Framework

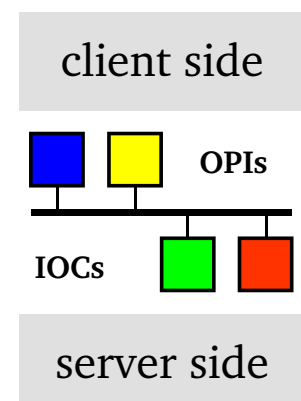
Alle in der Vergangenheit am S-DALINAC eingesetzten Kontrollsysteme waren am Institut für Kernphysik der TU Darmstadt entwickelt worden. Das nun eingesetzte Software-Framework EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) wird dagegen weltweit eingesetzt und in Zusammenarbeit vieler einzelner Institute entwickelt [56]. Alle wesentlichen Bestandteile stehen der Öffentlichkeit als Open-Source-Software zur Verfügung. Dies umfasst Werkzeuge, Bibliotheken und ganze Anwendungen. Auf dieser Grundlage lassen sich verteilte, echtzeitfähige Kontrollsysteme für große Installationen erstellen, ohne Quelltext in großem Umfang schreiben zu müssen. Die auf das Grundsätzliche reduzierte Struktur solcher Systeme ist in Abbildung 5.1 skizziert.

EPICS kommt überwiegend in der Forschung an Teilchenbeschleunigern, Teilchendetektoren und großen Teleskopen zum Einsatz. Oberflächlich betrachtet können

Abb. 5.1.: Prinzipielle Struktur eines EPICS-basierten Kontrollsystems. Ein Netzwerk (schwarze Linien) dient zum Informationsaustausch zwischen unterschiedlichen *Teilnehmern*.

Die auf der Server-Seite eingezeichneten Teilnehmer (grün und rot) sind häufig sogenannte IOCs (*Input-Output-Controller*). Diese steuern die Endgeräte, wie etwa die Magnetnetzteile.

Andere Teilnehmer treten als Clients auf. Oft sind dies sogenannte OPIs (*Operator Interfaces*).



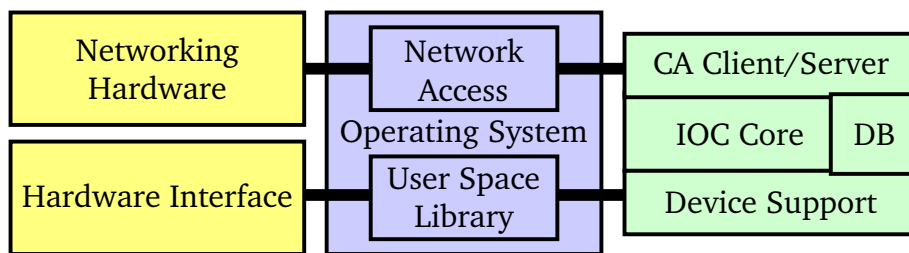


Abb. 5.2.: Stark vereinfachte Darstellung der Struktur eines IOCs. Neben gewissen Kernkomponenten (*IOC Core* mit Echtzeitdatenbank *DB*) enthält praktisch jeder IOC eine Schnittstelle, um über das *Channel-Access-Protokoll* zu kommunizieren. Ebenso sind im Regelfall ein oder mehrere (austauschbare) *Device-Support-Module* eingebunden, welche den Zugriff auf die Hardwareschnittstellen implementieren. Diese Zugriffe geschehen meist über Bibliotheken.

diese Kontrollsysteme sehr unterschiedlich aussehen. Intern gleichen sich jedoch viele Softwarekomponenten. Die folgenden Unterabschnitte sollen exemplarisch die wichtigsten dieser Komponenten erläutern.

5.1.1. Input-Output-Controller

Jene Computer, welche die Kommunikation mit den zu steuernden Geräten vornehmen, werden als *Input-Output-Controller* (IOC) bezeichnet. Sie bilden somit einen grundsätzlichen Bestandteil des Kontrollsystems. Abbildung 5.2 zeigt ihren schematischen Aufbau. Jeder IOC verfügt über eine Echtzeitdatenbank. Sie enthält die aktuellen Werte der von diesem IOC verwalteten *Prozessvariablen* (diese sogenannten *aktuellen Werte* sind in der Realität aufgrund technischer Verzögerungen immer um eine gewisse Zeit veraltet. Für die meisten Anwendungen ist dieser Unterschied jedoch unerheblich).

Die Kommunikation mit entfernten Rechnern geschieht über das im folgenden Abschnitt näher erläuterte *Channel-Access-Protokoll*. Eine entsprechende Server-Komponente ist somit ebenfalls Teil jeden IOCs. Sie kann auf die Echtzeitdatenbank zugreifen, um Prozesswerte auszulesen und über das Netzwerk zu versenden oder sie zu verändern. Ein IOC kann jedoch auch als *Channel-Access-Client* in Erscheinung treten und somit Prozessdaten von anderen IOCs empfangen.

Die Kommunikation mit den zu steuernden Geräten wird über ein sogenanntes *Device-Support-Softwaremodul* abgewickelt. Ein IOC kann ein oder mehrerer dieser Module enthalten, um auf verschiedene Hardwareschnittstellen zugreifen zu können. Es steht eine Vielzahl dieser Softwaremodule als Open-Source-Software

zur Verfügung. Gerade für die verbreiteten Hardwareschnittstellen und Protokolle kann daher auf existierende Projekte zurückgegriffen werden. Soll eine neue Schnittstelle oder ein neues Protokoll unterstützt werden, muss lediglich ein neues *Device-Support-Modul* entwickelt werden. Die restlichen Programmteile eines IOCs sind so gestaltet, dass sie unabhängig von der Wahl eines *Device-Support-Moduls* funktionieren.

5.1.2. Das *Channel-Access-Protokoll*

Funktionsprinzip

Das *Channel-Access-Protokoll* dient zum Austausch von Prozesswerten. Es basiert auf dem verbindungsorientierten TCP (*Transmission Control Protocol*) und dem verbindungslosen UDP (*User Datagram Protocol*). Eine starke Vereinfachung der Pflege eines Kontrollsystems ergibt sich aus der weitgehenden Konfigurationsfreiheit, die dieses Protokoll bietet. Es ist insbesondere nicht notwendig, auf Seiten eines Clients eine Zuordnung von *Prozessvariablen* (PV) zu Netzwerkadressen der zugehörigen Server zu hinterlegen. Innerhalb einer Broadcast-Domäne können die *Channel-Access-Server* (CA-Server), welche die gesuchte Prozessvariable in ihrer lokalen Echtzeitdatenbank führen, automatisch identifiziert werden. Hierzu wird vom *Channel-Access-Client* (CA-Client) zunächst der gesuchte Name in einem UDP-Broadcast ausgesendet. Findet ein CA-Server diesen Namen in seiner lokalen Datenbank, zeigt er dies über eine an den Client gerichtete UDP-Nachricht an (vgl. Abbildung 5.3).

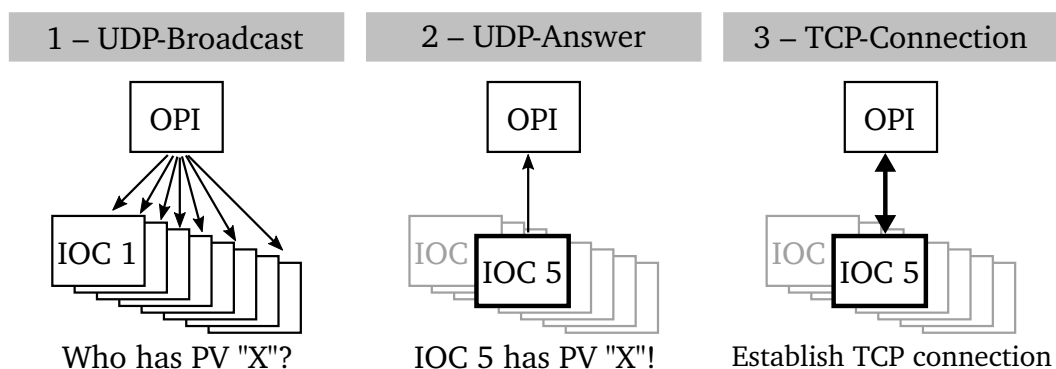


Abb. 5.3.: Zeitlicher Ablauf des Verbindungsaufbaus des *Channel-Access-Protokolls*.

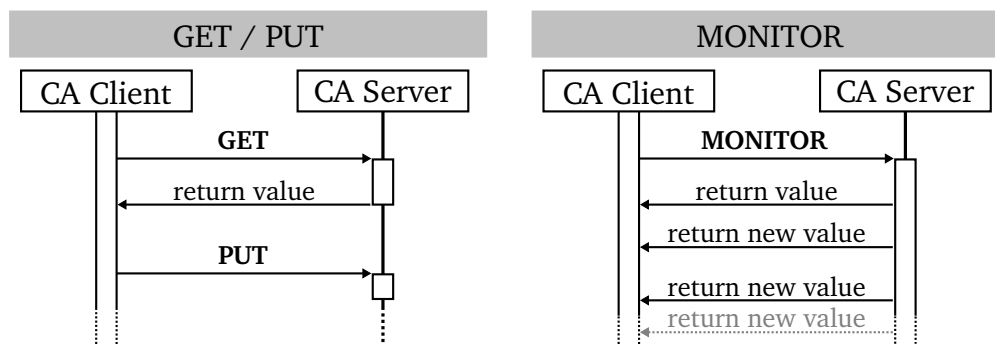


Abb. 5.4.: Nachrichtenreihenfolgediagramm zu den Operationen für Schreib- und Lesezugriffe des *Channel-Access-Protokolls*. Die Operationen GET und PUT erlauben das einmalige Lesen, bzw. Schreiben eines Wertes. Eine effiziente Übertragung des sich immer wieder verändernden Wertes einer Prozessvariablen (PV) erlaubt die MONITOR-Operation. Nach einmaliger Anmeldung beim CA-Server, sendet letzterer automatisch genau dann einen Wert, wenn sich die PV verändert hat.

Ist dem Client ein CA-Server bekannt, welcher eine bestimmte Prozessvariable in seiner Echtzeitdatenbank führt, so kann er gezielt eine TCP-Verbindung zu diesem aufbauen. Anschließend können die Prozessdaten selbst ausgetauscht werden. Hierfür stehen im Wesentlichen drei Operationen zur Verfügung: PUT, GET, MONITOR. Schreibzugriffe – d. h. der CA-Client verändert den Wert einer Prozessvariablen in der Echtzeitdatenbank des CA-Servers – geschehen über die PUT-Operation. Für Lesezugriffe gibt es zwei unterschiedliche Verfahren. Die GET-Operation liefert einmalig den derzeitigen Wert der betrachteten Prozessvariablen. Die Operation MONITOR implementiert einen *Publish-Subscribe-Mechanismus* und ermöglicht eine effiziente Nutzung der Netzwerkressourcen für wiederholte Lesezugriffe. Hierzu zeigt der CA-Client dem Server sein dauerhaftes Interesse an der zeitlichen Entwicklung einer Prozessvariablen an. Der CA-Server sendet in der Folge immer dann einen neuen Wert, wenn dieser sich verändert hat. Abbildung 5.4 skizziert die Funktionsweise der drei genannten Operationen.

Das *Channel-Access-Protokoll* kann Daten unterschiedlicher Typen übertragen. Neben primitiven Datentypen, wie Ganz-, Gleitkommazahlen und Zeichenketten, lassen sich auch zugehörige Metadaten, wie Alarmzustand und Zeitstempel, übertragen.

Die an dieser Stelle erfolgte Darstellung des *Channel-Access-Protokolls* ist stark vereinfacht. Es existieren selbstverständlich eine ausführliche Dokumentation und Spezifikation [57, 58].

Nachteile des *Channel-Access*-Protokolls

Einige Eigenschaften des *Channel-Access*-Protokolls können sich unvorteilhaft auswirken.

So könnte eine Prozessvariable irrtümlich in den Echtzeitdatenbanken mehrerer IOCs geführt werden. In diesem Fall liefert der oben beschriebene Mechanismus, zur automatischen Ermittlung der Netzwerkadresse des IOCs, der diese Prozessvariable verwaltet, kein definiertes Ergebnis. CA-Client-Anwendungen wählen den CA-Server aus, dessen Antwort zuerst empfangen wurde. Dies kann bei wiederholten Versuchen der Adressermittlung zu wechselnden Ergebnissen führen. Für den Betrieb eines EPICS-basierten Kontrollsystems bedeutet dies, dass die Konfiguration aller IOCs in einer Art und Weise zu verwalten ist, die sicherstellt, dass PV-Bezeichner eindeutig sind.

Die oben beschriebene, konfigurationsfreie Adressermittlung skaliert nicht mit der Größe des gesamten Kontrollsystems: In großen Systemen gibt es viele OPIs und viele IOCs. Dementsprechend sind viele Broadcasts zur Ermittlung der Netzwerkadresse zu einem PV-Namen zu erwarten. Sämtliche IOCs müssen daher häufig ihre lokale Echtzeitdatenbank durchsuchen und entsprechende Rechenleistung aufbringen. Auch das Netzwerk wird durch ungerichtete Nachrichten ineffizient genutzt. Für den S-DALINAC spielt diese Problematik keine Rolle, da aufgrund der geringen Größe des gesamten Kontrollsystems keine nennenswerten Belastungen von Netzwerk und PCs auftreten. Bei sehr großen Systemen müsste dem hingegen mit zusätzlichen Maßnahmen, z. B. durch die Schaffung mehrerer Broadcast-Domänen, begegnet werden.

Die oben beschriebene MONITOR-Operation ist nur dann effizient, wenn sich eine Prozessvariable nicht zu oft ändert. Gerade bei Messgrößen, die ein starkes Rauschen aufweisen, besteht die Gefahr, dass sehr viele, quasi informationsfreie Übertragungen veranlasst werden. Es kann zwar eine absolute Schwelle für die Auslösung einer Übertragung für jede Prozessvariable eingestellt werden, jedoch ist dies nicht in allen Fällen hinreichend. Für Größen, bei welchen relative Änderungen ausschlaggebend sind (z. B. Vakuumdrücke, da diese über viele Größenordnungen variieren können), führt dies nicht zu einer wirkungsvollen Reduktion. Als Gegenmaßnahme müssen ggf. händisch entsprechende Mittelwertbildungen konfiguriert werden.

Eine Übertragung von kontinuierlichen Datenströmen, z. B. eines mit hoher Abtastrate (1 kS/s und mehr) digitalisierten Signals, ist nicht effizient möglich. In [16] wurde daher für die Netzwerkübertragung von Datenströmen aus den FPGAs der digitalen Hochfrequenzregelung ein Softwaremodul erstellt. Es ist zwar Teil des

IOCs, verwendet jedoch nicht das *Channel-Access*-Protokoll. Im Kontrollsystem des S-DALINAC gibt es eine solche Anforderung zur Zeit nur an der genannten Stelle, weshalb dieser Nachteil nicht gravierend ist.

5.1.3. Nicht-technische Vorteile beim Einsatz von EPICS

Ein Vorteil beim Einsatz von EPICS ist die in Bibliotheken implementierte Grundfunktionalität. Sie wird vielfach eingesetzt und kann daher als gut getestet angesehen werden. Ein weiterer ist die Existenz einer Gemeinschaft von Nutzern und Entwicklern, die auf unterschiedlichen Wegen miteinander vernetzt sind. Dies erleichtert die Entwicklung eines vollständigen Kontrollsystems auf Grundlage von EPICS erheblich. Es stehen für viele technische Fragen externe Ansprechpartner zur Verfügung.

Dieser Vorteil käme, ebenso wie jener der reinen Verfügbarkeit von technischen Komponenten und Implementierungsmustern, natürlich auch bei der Verwendung anderer Open-Source-Kontrollsysteme zum Tragen. Die konkrete Wahl von EPICS ist zu einem gewissen Teil auch in der als etwas einfacher eingeschätzten Zugänglichkeit für Einsteiger begründet.

5.1.4. Nachteile von EPICS

Neben den bereits genannten Nachteilen des *Channel-Access*-Protokolls (vgl. Abschnitt 5.1.2), sollen an dieser Stelle auch weitere Nachteile beim Einsatz von EPICS besprochen werden. Die meisten Nachteile resultieren aus der Tatsache, dass die Entwicklung extern stattfindet.

Im Gegensatz zu einer Eigenentwicklung bieten externe Lösungen meistens mehr Funktionalität als erforderlich. Dies stellt keinen unmittelbaren Nachteil dar, führt aber mitunter zur Verlängerung der Einarbeitungszeit. Bei einer auf die eigenen Anforderungen zugeschnittenen Software *kann* die Einweisung eines neuen Mitarbeiters einfacher sein.

Wie bei nahezu jeder Software müssen zur Installation von EPICS und zum Betrieb eines darauf basierenden Kontrollsystems externe Abhängigkeiten erfüllt sein. Dies sind teilweise Softwarebibliotheken, aber auch die Auswahl der zum Erstellen der ausführbaren Dateien verwendeten Softwarewerkzeuge. Beides wird durch externe Entwickler bestimmt. Ein Nachteil ergibt sich daraus, dass die hausintern entwickelten Programme, welche es auch in einem EPICS-basierten Kontrollsystem immer gibt, eventuell andere Werkzeuge einsetzen. Die Pflege des

Kontrollsystems erfordert daher entsprechende Einarbeitung in die verschiedenen Werkzeuge.

Ein organisatorischer Nachteil eines von vielen Institutionen entwickelten und eingesetzten Kontrollsystembaukastens wie EPICS ergibt sich aus dem Umfeld, in welchem die Software eingesetzt wird. Meist handelt es sich um Teilchenbeschleuniger oder andere in Aufbau und Betrieb sehr teure Großgeräte. Dementsprechend ist eine hohe Stabilität der Kontrollsystemsoftware gefordert, um Ausfallzeiten gering zu halten und Schäden aufgrund von Fehlfunktionen zu vermeiden. Die in den vergangenen Jahren am S-DALINAC gewonnenen Erfahrungen zeigen, dass die Stabilität der hier eingesetzten EPICS-Komponenten tatsächlich sehr hoch ist. Jedoch erschwert eine solche Anforderung auch die Fortentwicklung der Software. Gerade an Anlagen, die sehr viel größer als der S-DALINAC sind, wird nach der initialen Inbetriebnahme auf Veränderungen des Kontrollsystems für mehrere Jahre weitgehend verzichtet. Dies geschieht, da der Erhaltung der Stabilität meist Vorrang vor der Einführung neuer Funktionalität gegeben wird. Am S-DALINAC wäre dagegen ein *Rolling-Release*-Modell mit hoher Wahrscheinlichkeit ein besseres Vorgehen. Bei solchen Modellen wird Software in kurzen Zyklen zu einem überschaubaren Grad weiterentwickelt und anschließend schnell zum Einsatz gebracht. So lässt sich die gewählte Entwicklungsrichtung zeitnah auf ihre Zweckmäßigkeit überprüfen und neue Funktionalität nutzbar machen. Dieser Nachteil wird derzeit immer weniger relevant, da die meisten EPICS-Projekte ihren Releasezyklus in den vergangenen Jahren verkürzt haben.

Als Beispiel für einen technischen Nachteil kann die begrenzte Rekonfigurierbarkeit von IOCs im Betrieb angesehen werden. Am S-DALINAC hat sich dies als wenig problematisch erwiesen, da keine extremen Anforderungen an die Verfügbarkeit gestellt werden. Aufgrund von Neustarts verursachte Ausfälle einzelner IOCs dauern außerdem in der Regel nur einige Sekunden an und werden daher im Regelbetrieb durch die Operateure kaum wahrgenommen.

Konzeptionell nicht vorgesehen ist die Abbildung von ganzen Geräten, beispielsweise eines Magnetnetzteils, als solche. Der Namensraum der Prozessvariablen enthält keine Hierarchie. So wird ein Magnetnetzteil zwar durch einen gewissen Satz von Prozessvariablen repräsentiert, jedoch sind diese intern nicht zu einem Gerät gruppiert. Lediglich über eine PV-Namenskonvention bei der Konfiguration der Prozessvariablen kann der Entwickler implizit andeuten, dass verschiedene Prozessvariablen zu einem einzelnen Gerät gehören. Dies erschwert die Abstrahierung von Funktionalität. Der Entwickler muss bei der Einbindung unterschiedlicher Magnetnetzteiltypen darauf achten, dass die jeweiligen Implementierungen sich äußerlich gleichen. Zum Beispiel sollten das Ein- und Ausschalten oder das Verändern des Setzwertes immer in gleicher Art und Weise möglich sein. Dies

kann zwar durchgeführt werden, jedoch gibt es keinen technischen Mechanismus der dies konsequent erzwingt.

Zusammenfassend soll angemerkt werden, dass die genannten Nachteile zwar vorliegen, aber durch die Vorteile bei weitem aufgewogen werden. Daher wird EPICS als Basis für den zukünftigen Betrieb des S-DALINAC dennoch als eine mehr als hinreichend zweckmäßige Lösung betrachtet.

5.2. Frühere Kontrollsysteme am S-DALINAC

EPICS wurde erstmals im Jahr 2010 zum Betrieb des S-DALINAC eingesetzt. Zuvor waren zunächst ein PDP-11-Computer für die Netzteilsteuerung und Strahldiagnose, später VAX- und Alpha-Rechner im Einsatz [55]. Ein Teil des Kontrollsystems wurde zwischenzeitlich auf kostengünstige PC-Hardware und die verbreiteten Betriebssysteme Windows und Linux umgestellt [59, 34, 54]. Dabei kam es jedoch in Teilen zu Insellösungen für einzelne Subsysteme, wie etwa die Steuerung der thermionischen Elektronenquelle [60] und das QM07-Messsystem [37]. Die Steuerung der Hochfrequenzsysteme erfolgte weiterhin über ein gesondertes Kontrollsystem.

Abbildung 5.5 zeigt die Zersplitterung des damaligen Kontrollsystems in mehrere praktisch vollständig getrennte Domänen. Unterschiede bestanden dabei nicht nur in der Verarbeitung von Prozessdaten, sondern auch bei den zugrunde liegenden Hard- und Softwareplattformen, Bibliotheken und Kommunikationsprotokollen. Dies bedeutete eine gravierende Erschwerung der Wartung des Systems, da jedes einzelne Subsystem vom verantwortlichen Personal als individuelle Entwicklung verstanden und gepflegt werden musste. Viele Teilprobleme, die in praktisch jeder Realisierung eines Kontrollsystems gelöst werden müssen, waren somit wiederholt und auf unterschiedliche Art und Weise implementiert worden. So konnten graphische Benutzeroberflächen nicht einmalig entwickelt und dann in konsistenter Form für alle Teilsysteme verwendet werden. Jedes Teilsystem enthielt eine individuelle Lösung für die graphische Bedienung. Dass eine solche Struktur die Wiederverwendung von Diensten erschwert, ist am Beispiel des in Abbildung 5.5 angedeuteten Mechanismus zur Archivierung von Prozessdaten erkennbar. Diese wurde ursprünglich für die Archivierung von Prozessdaten des Heliumverflüssigers entwickelt. Trotz der langen Existenz dieses Archivs wurden lediglich von einem einzigen anderen Teilsystem Daten dort abgelegt. Dass keine Nutzung durch weitere Teile des Kontrollsystems erfolgte, dürfte vorwiegend auf den für die Entwicklung einer geeigneten Softwareschnittstelle notwendigen Aufwand zurückzuführen sein.

Subsystem:	Gun	Beam Transport	Beam Diagn.	QM07	Cryo-Systems	RF Systems
Year:	2009	<2006	<2006	<2009	2006	<2000
Platform:	PC Linux	PC Windows®	PC Windows® Linux	PC Suse Linux	PC Debian Linux	Alpha VMEbus OpenVMS™ VxWorks™
Protocol:	A	B		C	D	E
Archive:				Process Data Archive		

Abb. 5.5.: Einbindung der unterschiedlichen Subsysteme in das Kontrollsystem des S-DALINAC vor Beginn der EPICS-Migration. Die Jahreszahlen geben die ungefähren Zeitpunkte der Einführung der einzelnen Lösungen an. Als Hardware-Plattform kamen zwar überwiegend PCs, jedoch viele unterschiedliche Betriebssysteme zum Einsatz. Es wurden verschiedene Protokolle (hier willkürlich als A-E bezeichnet) zur Kommunikation zwischen den jeweiligen Client und Server-Systemen eingesetzt. Dadurch zersplitterte das Kontrollsystem in Domänen zwischen welchen ein Austausch von Prozessdaten nicht möglich war. Somit musste jede Domäne auch eigene OPIs bereitstellen. Das Prozessdatenarchiv des Heliumverflüssigers wurde lediglich vom QM07-Auslesesystem mitgenutzt.

5.3. Beginn der Migration auf EPICS

Eine frühere Umstellung auf ein EPICS-basiertes Kontrollsystem war aus den im Folgenden beschriebenen Gründen nicht geschehen. Im Zeitraum des Entwurfs und Aufbaus des S-DALINAC existierte EPICS noch nicht. Anfang der neunziger Jahre existierte bereits die Kollaboration, unter welcher die Entwicklung bis heute stattfindet. Die damals enthaltene Funktionalität erlaubte bereits die Verwendung an mehreren Laboratorien (alle in den USA). Auch für den später nicht weiter finanzierten *Superconducting Super Collider* wurde ein auf EPICS basierendes Kontrollsystem projiziert [61]. Die Stabilität, die dieser Software demnach unterstellt werden kann, hätte den Einsatz am S-DALINAC erlaubt.

Für den S-DALINAC war zunächst ein eigenes Kontrollsystem entwickelt worden. Bei einer zwischenzeitlichen Erneuerung (um das Jahr 2000) wurde EPICS als Basis für eine Neuentwicklung wiederum verworfen. Als Grund wurde die mangelnde Kompatibilität der vorhandenen Hardware angeführt [55].

Die Entwicklung einer neuen, digitalen Hochfrequenzregelung erforderte schließlich den Ersatz des zur Steuerung der Hochfrequenzsysteme eingesetzten Kontrollsystems [16]. Es war technisch nicht machbar, die massiv erweiterten Mög-

lichkeiten der digitalen Diagnose der neuen Regelungselektronik über das alte Hochfrequenzregelungs-Kontrollsystem dem Operateur zugänglich zu machen. Ausschlaggebend für die Entscheidung, hierfür ein EPICS-basiertes System zu entwickeln, war unter anderem die zwischenzeitlich erfolgte Änderung der Lizenz, unter welcher EPICS genutzt werden kann [62]. Während zuvor zumindest bürokratische und evtl. auch finanzielle Hürden hätten überwunden werden müssen, um EPICS zu nutzen, sind inzwischen alle relevanten Quelltexte als Open-Source-Software erhältlich. Sie können, ohne für den Betrieb am S-DALINAC wesentliche juristische Einschränkungen verändert und eingesetzt werden. Außerdem war die Struktur der Software in der Art verändert worden, dass sie nun weitgehend plattformunabhängig eingesetzt werden kann und somit auch auf einfachen Linux-PCs verwendbar ist [62].

5.4. Beweggrund für die weitere Migration

Die Inbetriebnahme der digitalen Hochfrequenzregelung erfolgte mit einem eigens hierfür entwickelten EPICS-IOC. Auch die Magnetnetzteile waren im Rahmen der Erneuerung der Hochfrequenzregelung umgebaut worden. Sie wurden durch den in [59] entwickelten nicht-EPICS-Kontrollsystem-Server gesteuert. Die Ansteuerung des Beschleunigers war somit wieder möglich und es wurden Strahlzeiten in dieser Konfiguration durchgeführt.

Dennoch wurde die Migration auf ein reines EPICS-basiertes Kontrollsystem weiter vorangetrieben. Hierfür sind mehrere Gründe anzuführen:

1. Reduzierung der Menge des zu verwaltenden Softwarequelltextes.
2. Reduzierung der Anzahl von Paradigmen/Konzepten, die den unterschiedlichen Softwarelösungen zugrunde liegen und von den Entwicklern verstanden werden müssen.
3. Vermeidung von Domänen, zwischen welchen keine Durchlässigkeit für Prozessdaten besteht.

Die Reduzierung der Anzahl einzelner Softwareprojekte und somit auch der Menge des zu verwaltenden Quelltextes waren ein wichtiges Ziel. Jedes Projekt erfordert eine gewisse Anzahl von technischen Abhängigkeiten (zum Beispiel Softwarebibliotheken) und stellt gewisse Anforderungen an die Umgebung (insbesondere das Betriebssystem). Diese Abhängigkeiten nur zu kennen, erfordert bereits eine erhebliche Einarbeitung für das zuständige Personal. Die Erfüllung

dieser Abhängigkeiten zu jedem Zeitpunkt zu gewährleisten, ist deutlich schwieriger, da die Entwicklung von Betriebssystemen und von der überwiegenden Anzahl von Softwarebibliotheken durch andere Parteien erfolgt. Hierzu sind immer wieder Veränderungen an den eigenen, eigentlich funktionsfähigen Programmen erforderlich. Eine Minimierung des Aufwandes wird daher durch eine Minimierung des Umfangs der eigenen Software zugrunde liegenden Quelltexten und Abhängigkeiten erzielt.

Eine vervollständigte Migration auf ein einziges Kontrollsystem bedeutet darüber hinaus, dass Entwickler lediglich die Architektur und Software-Mechanismen eines Systems verinnerlichen müssen. Dies vereinfacht die Einarbeitung und Pflege, da das Vorgehen für bestimmte Aufgaben vereinheitlicht wird. Der parallele Betrieb unterschiedlicher Kontrollsystemdomänen erfordert immer wieder ein mentales Umschalten zwischen den unterschiedlichen Ansätzen. So ähneln sich die Client-Server-Architekturen vieler Systeme zwar, aber die verwendeten Kommunikationsprotokolle sind verschieden. Dies macht unterschiedliche Softwarewerkzeuge zu Diagnosezwecken erforderlich. Ein weiteres Beispiel sind Prozessvariablen. In manchen Systemen – auch in EPICS – sind diese in einem flachen Namensraum organisiert und werden in Textdateien einzeln definiert. Andere Kontrollsysteme bilden Hierarchien und können ganze Geräte, die mitunter durch viele Prozessvariablen modelliert werden, abbilden.

Die Existenz unterschiedlicher Kontrollsystemdomänen, welche jeweils disjunkte Teilmengen der angesteuerten Geräte enthalten, führt zu einer Zersplitterung, die nur durch zusätzlichen Aufwand verdeckt werden kann. So können Daten zunächst nicht ausgetauscht werden, da jede Domäne eigene Protokolle verwendet. Lediglich durch den Einsatz weiterer Softwarekomponenten könnten die Daten ausgetauscht werden. Dies bedeutet im Sinne der weiter oben erläuterten Punkte aber erhöhte Komplexität und Wartungsaufwand aufgrund des steigenden Quelltextumfangs. Daher ist die Beschränkung auf eine einzelne Kontrollsystemdomäne zu bevorzugen.

6. Migration des Beschleunigerkontrollsystems

Die Migration des Beschleunigerkontrollsystems war im Jahr 2010 im Rahmen des Aufbaus der digitalen Hochfrequenzregelung begonnen worden [16]. Auf diesem Wege konnten die ersten Betriebserfahrungen mit den dafür eingesetzten Softwarekomponenten gesammelt und daraufhin die vollständige Migration als definitives Ziel erklärt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden umfangreiche Beiträge zur Vervollständigung dieser Migration geleistet. Die Einbindung der Elemente zur Strahldiagnose anhand von Leuchtschirmen wird derzeit im Rahmen von [63] vorgenommen.

6.1. Strategie der Migration

Um den Betrieb kontinuierlich gewährleisten zu können, wurden die einzelnen für den Beschleunigerbetrieb notwendigen Geräte über Jahre hinweg schrittweise in das neue Kontrollsystem integriert [64, 65]. So konnten die jeweils erforderlichen Änderungen als überschaubare Teilaufgaben bearbeitet werden. Nach einem Testzeitraum von einigen Wochen bis Monaten wurden die neuen Softwarekomponenten im Regelbetrieb eingesetzt. Der Nachteil dieser Vorgehensweise war die nur allmählich schwindende Zersplitterung der einzelnen Kontrollsystemdomänen. Im Gegenzug konnte auf diesem Wege der Betrieb regelmäßig von der fortschreitenden Migration profitieren und die jeweils gewonnenen Erfahrungen in die Entwicklung der folgenden Komponenten einfließen.

Um die Zahl der mit alten Kontrollsystemkomponenten angesteuerten Gerätetypen nicht wachsen zu lassen, wurden gänzlich neue Geräte grundsätzlich direkt in das EPICS-basierte System aufgenommen.

6.2. Überblick über Subsysteme des Beschleunigers

In Abbildung 5.5 (Seite 54) waren bereits die wichtigsten Subsysteme aufgelistet worden. Tabelle 6.1 schlüsselt diese weiter auf. Sie enthält auch Angaben zu den jeweiligen Kommunikationsschnittstellen. Die Tabelle ist aus Gründen der Lesbarkeit nicht ganz vollständig. Sie zeigt in der letzten Spalte an, ob ein Gerät auch über das Netzwerk angesprochen werden kann. Diese Möglichkeit wird in

den folgenden Abschnitten näher erläutert. In den folgenden Abschnitten wird die prinzipielle Integration der unterschiedlichen Schnittstellen in das Beschleunigerkontrollsystem diskutiert. Abschnitt 6.4 thematisiert nochmals einige der in Tabelle 6.1 aufgeführten Subsysteme. Dort wird insbesondere die Einbindung der Subsysteme beschrieben, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit in das Kontrollsystem integriert wurden.

6.3. Integration von Geräten mit unterschiedlichen Hardwareschnittstellen

Bevor in Kapitel 6.4 auf die Umsetzung der Ansteuerung konkreter Geräte eingegangen wird, soll zunächst die Art der verwendeten Hardwareschnittstellen und der jeweils zugehörigen Softwaremodule diskutiert werden.

6.3.1. Zustand zu Beginn dieser Arbeit

Ansteuerung hausintern entwickelter Geräte

Im Rahmen von [16] waren zwei *Device-Support*-Softwaremodule entwickelt worden. Eines dient zur Ansteuerung von Geräten über den *CAN-Bus*. Es nutzt das *SocketCAN*-Framework des Linux-Kernels. Dieses erlaubt den Zugriff auf *CAN-Bus*-Schnittstellen durch mehrere Anwendungen gleichzeitig. Außerdem verbirgt es herstellerspezifische Eigenschaften des jeweils verwendeten *CAN-Bus*-Schnittstellenadapters. Dieses *Device-Support*-Modul ist somit mit unterschiedlichen *CAN-Bus*-Schnittstellenadaptern ohne weitere Programmierarbeit verwendbar [66].

Das zweite Modul dient zur Auslese von Diagnosedaten aus den FPGAs der digitalen Hochfrequenzregelung. Die Daten werden von diesem System über USB-Schnittstellen zur Verfügung gestellt, vom *Device-Support*-Modul eingelesen und direkt über das Netzwerk zugänglich gemacht. In reduzierter Form sind sie auch über das *Channel-Access*-Protokoll zugreifbar. Dieses *Device-Support*-Modul musste im Rahmen der vorliegenden Arbeit modifiziert werden, um die zusätzliche Überwachung der neu aufgebauten Phasenmonitorelektronik durch den IOC der Hochfrequenzregelung zu ermöglichen (vgl. Kap. 2.5). Die vorgenommenen Veränderungen sind in Anhang B ausgeführt.

Tab. 6.1.: Aufschlüsselung der in den einzelnen Subsystemen anzusteuernenden Geräte und deren Schnittstellen. Gegenüber Abbildung 5.5 sind hier auch Vakuum-System (zuvor gar nicht ausgelesen) und das Alarmsystem aufgelistet. Die Spalte „LAN“ zeigt an, ob die genannte Schnittstelle sich über das Netzwerk ansprechen lässt. Nähere Erläuterungen hierzu folgen in den weiteren Abschnitten.

Subsystem/Komponente	Geräte: Schnittstelle	LAN
gun		
Glühkathode	7-A-Netzteile: <i>CAN-Bus</i>	nein
Wehnelt-Zylinder	40-V-Netzteile: <i>CAN-Bus</i>	nein
Spannungsteiler	<i>Analoge Signale</i> →QM07	–
Beam Transport		
Dipolmagnete	kommerzielle Netzteile: <i>Seriell</i>	ja
Sonstige Magnete	7/10-A-Netzteile: <i>CAN-Bus</i>	ja
Variable Weglänge (alt)	Analoge Steuerung: <i>CAN-Bus</i>	nein
Variable Weglänge (neu)	Schrittmotosteuerung: <i>LAN</i>	ja
Beam Diagnostics		
BeO-Schirme	„Target“-Controller: <i>CAN-Bus</i>	nein
Video-Kameras	Videomultiplexer: <i>LAN</i>	ja
Strahlstrommessung	<i>Analoge Signale</i> →QM07	–
Strahlverlustmessung	<i>Digitale Signale</i> →QM07	–
QM07		
Strommessung	QM07-Prozessoreinheit: <i>CAN-Bus</i>	nein
Spannungsmessung	QM07-Prozessoreinheit: <i>CAN-Bus</i>	nein
Impulszähler	QM07-Prozessoreinheit: <i>CAN-Bus</i>	nein
Cryo Systems		
Temperatursensoren	kommerzielle Messgeräte: <i>Seriell</i>	ja
Pumpstand/Kompressor	S7-SPS: <i>ISO on TCP</i>	ja
sonstige Prozessgrößen	Industrielles-I/O-Modul: <i>Modbus/TCP</i>	ja
RF Systems		
Regelkreise (Steuerung)	LLBBC: <i>CAN-Bus</i>	nein
Regelkreise (Überwachung)	LLBBC: <i>USB</i>	nein
Frequenzsteller	100-V-/7-A-Netzteile: <i>CAN-Bus</i>	nein
Frequenzsteller (2-Zeller)	Schrittmotorsteuerung: <i>Seriell</i>	ja
Vacuum Systems		
Vakuum-Sensoren	kommerzielle Messgeräte: <i>Seriell</i>	ja
Vakuum-Ventile	Ventilst.-SPS: <i>Modbus/TCP</i>	ja
Alarm System		
Alarmsystem	Alarm-SPS: <i>Modbus/TCP</i>	ja

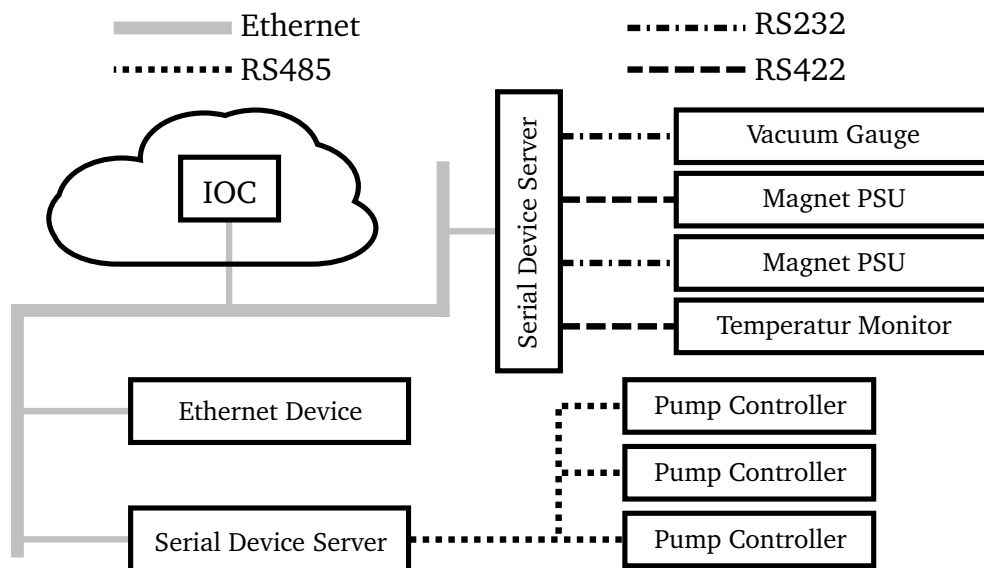


Abb. 6.1.: Schematische Darstellung der Anbindung von Geräten mit den Schnittstellen RS-232/422/485. Der zentral auf einer *virtuellen Maschine* ausgeführte IOC greift über Ethernet (TCP oder UDP über IP) auf die Geräte zu. Dies erfolgt bei Geräten mit nativer Ethernetschnittstelle direkt und anderenfalls über *serielle Geräteserver* (*serial device server*). An *serielle Geräteserver* lassen sich mehrere Geräte anschließen. Diese lassen sich unabhängig voneinander, über jeweils einen eigenen TCP-Port, ansprechen.

Ansteuerung kommerzieller Geräte

Ebenfalls im Rahmen von [16] wurden Geräte, welche über den Austausch von ASCII-Nachrichten in Form von Zeichenketten basierte Kommunikation gesteuert werden, in das Kontrollsystem eingebunden. Die Hardwareschnittstellen der hier betrachteten Geräte entsprechen dem RS-232-, RS-422- oder RS-485-Standard. Um die Geräte mit geringem Aufwand ansteuern zu können, werden sie mittels *serieller Geräteserver* über das Netzwerk verfügbar gemacht. Diese erlauben es, zu dem angeschlossenen seriellen Gerät über TCP eine Verbindung aufzubauen, um die Daten auszutauschen. Geräte neuerer Bauart haben oft auch eine Ethernet-Schnittstelle und treten in gleicher Art und Weise als Server auf. Somit können die räumlich verteilten Geräte dieser Schnittstellen von einem zentralen IOC angesteuert werden. Da dieser sämtliche Kommunikation über Netzwerkschnittstellen abwickelt, kann er auf einer sogenannten *virtuellen Maschine* (VM) installiert werden. Dies vereinfacht die Handhabung und erhöht die Zuverlässigkeit, da die verwendete Virtualisierungslösung auf redundanter Hardware aufgesetzt ist. Abbildung 6.1 skizziert diese Architektur.

Das eingesetzte *Device-Support*-Modul hat im Wesentlichen zwei Aufgaben zu erfüllen. Zum einen sind der Netzwerkzugriff an sich sowie das asynchrone auf dem Austausch von Nachrichten basierte Schema der Kommunikation zu handhaben. Zum anderen müssen die Zeichenketten vor dem Versenden an den *seriellen Geräteserver* erzeugt, bzw. jene, die von dort empfangen werden, interpretiert werden. Die erste Teilaufgabe wird durch das *asynDriver*-Softwaremodul gelöst. Es kann Netzwerkverbindungen zu den *seriellen Geräteservern* verwalten. Solche Verbindungen können dann für viele voneinander unabhängige Anfragen verwendet werden. Um sicherzustellen, dass nur eine Anfrage (möglicherweise aus mehreren vor- und rücklaufenden Nachrichten bestehend) gleichzeitig über eine Verbindung ausgeführt wird, werden entsprechende Mechanismen zur Verfügung gestellt [67, 68]. Lägen die empfangenen Daten bereits in einer geeigneten binären Form vor, so wäre das *asynDriver*-Softwaremodul hinreichend. Die zweite Teilaufgabe, die Nachrichten in Textform zu erzeugen, beziehungsweise zu interpretieren, wird durch das sogenannte *StreamDevice-Support*-Modul wahrgenommen [69, 70]. Es kann Zeichen- bzw. Bytesequenzen zerlegen und z. B. numerische Werte unterschiedlicher Formatierung erkennen und in eine binäre für die Weiterverarbeitung im IOC geeignete Darstellung konvertieren.

Die Einbindung eines neuen Gerätes erfordert in diesem Schema lediglich die Konfiguration der notwendigen Prozessvariablen in der Echtzeitdatenbank des IOCs, sowie eine Definition des zugrunde liegenden Protokolls in kompakter Textform.

6.3.2. Einbindung des Modbus-Protokolls

Die in Abschnitt 6.3.1 erwähnten kommerziellen Geräte umfassen ausschließlich solche mit Schnittstellen der Typen RS-232, RS-422, RS-485 und solche, die die gleiche Funktionalität über eine Ethernet-Schnittstelle zur Verfügung stellen. Ein in kommerziellen Geräten ebenfalls verbreiteter Standard ist *Modbus*.

Die Kommunikation erfolgt bei diesem Protokoll zwischen zwei oder mehreren Kommunikationspartnern in einer Master/Slave-Hierarchie [71]. Genau ein Teilnehmer muss als *Master* ausgezeichnet sein. Er allein bestimmt, wann ein Teilnehmer Daten senden darf. Dies erlaubt den Einsatz von Modbus auch dann, wenn nur ein Datenkanal für die Kommunikation zur Verfügung steht. Die Kommunikation erfolgt immer zwischen dem *Master* und einem weiteren Teilnehmer (*Slave*). Der direkte Informationsaustausch zwischen *Slave*-Teilnehmern ist somit nicht möglich. Dies ist für viele Anwendungen kein Nachteil, beispielsweise bei der zentralen Sammlung von Daten von industriellen *Remote-I/O*-Modulen.

Modbus kann auf verschiedenen physischen Medien eingesetzt werden. Am S-DALINAC kommen Geräte mit Ethernet-Schnittstelle (Modbus/TCP) und solche mit RS-485-Schnittstelle (RS485-Modbus) zum Einsatz. Um eine einheitliche Handhabung auf Seiten des Kontrollsystems zu erreichen, werden *Modbus-TCP-Gateways* eingesetzt. Sie treten stellvertretend für das RS-485-Gerät als Modbus/TCP-Slave auf und übersetzen den Datenaustausch bidirektional. Der wichtigste Vorteil ist die Möglichkeit, den zuständigen IOC wiederum zentral auf virtualisierter Hardware ausführen zu können.

Auf eine detaillierte Beschreibung des Kommunikationsablaufs wird an dieser Stelle verzichtet (ausführliche Beschreibungen finden sich in [71]). Entscheidend ist, dass er zwar nachrichtenbasiert ist, aber im Allgemeinen nicht auf ASCII-Zeichenketten basiert (tatsächlich erlaubt der Modbus-Standard auch die Übertragung in ASCII-Formaten – Geräte, welche diese Variante einsetzen, kommen am S-DALINAC derzeit jedoch nicht vor). Stattdessen enthält jede Nachricht einen binären Funktionscode, welcher dem Empfänger anzeigt, wie sie zu interpretieren und ggf. zu beantworten ist. Somit ist der zuvor beschriebene *StreamDevice*-Support für die Einbindung von Modbus-Geräten in das Kontrollsystem ungeeignet. Es stehen mehrere unterschiedliche *Device-Support*-Module für Modbus-Geräte als Open-Source-Software zur Verfügung. Als am flexibelsten einsetzbar wurde das *modbus-Device-Support*-Modul identifiziert [72]. Es nutzt ebenfalls das *asynDriver*-Modul; unter anderem um die Netzwerkverbindungen zu verwalten. Wie in Abbildung 6.2 (a) schematisch dargestellt, können sämtliche Modbusgeräte mittels Ethernet und Gateway-Geräten von einem einzelnen IOC angesteuert werden.

6.3.3. ISO on TCP (RFC1006)

Am S-DALINAC werden *speicherprogrammierbare Steuerungen* (SPS) der S7-300-Serie von Siemens eingesetzt.

Die Einbindung von SPS der S7-Serie in ein EPICS-basierte Kontrollsystem wurde in der Vergangenheit schon an anderen Beschleunigern vorgenommen. Das *Device-Support*-Modul *s7plc* wurde ursprünglich im Jahr 2000 für die *Swiss Light Source* entwickelt. Es wird inzwischen auch an anderen Instituten eingesetzt und kann daher als ausführlich getestet betrachtet werden. Es erlaubt den Zugriff auf die Steuerung allerdings nur bei geeigneter Konfiguration der SPS [73].

Das deutlich später entwickelte *Device-Support*-Modul *s7nodave* erfordert keinerlei Änderungen an der Projektierung der Steuerung [74, 75]. Der Datenaustausch

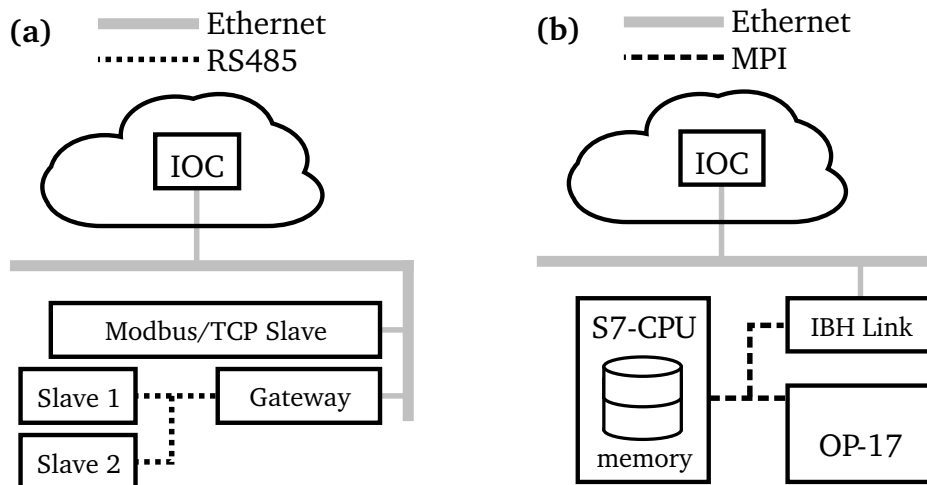


Abb. 6.2.: Schematische Darstellung der Einbindung von Geräten mit Modbus-Schnittstellen **(a)** bzw. von S7-300-Steuerungen **(b)** in das Kontrollsystem. Modbus-Geräte mit integrierter Ethernet-Schnittstelle lassen sich über das Netzwerk direkt ansprechen, solche mit RS-485-Schnittstelle über ein Gateway. Sie lassen sich dann ohne Unterscheidung in das Kontrollsystem einbinden. S7-SPS werden über Schnittstellenadapter (IBH-Link) angesprochen. Zugriffe erfolgen über das proprietäre MPI-Protokoll (auch von OP-17-Bedienfeld verwendet). Prozesswerte können damit direkt aus dem Speicher der CPU-Einheit ausgelesen werden.

mit der Steuerung erfolgt dabei nach dem in *RFC 1006* standardisierten *ISO-on-TCP*-Protokoll [76]. Dieses wird von einem kommerziell erhältlichen Schnittstellenadapter *IBHLink* [77] auf MPI umgesetzt; MPI ist eine von Siemens S7-Geräten verwendete Kommunikationsschnittstelle. Dieser Aspekt wird durch die verwendete Open-Source-Bibliothek *libnodave* [78] implementiert. Es nutzt ebenfalls *asynDriver*, um den eigenen Quelltextumfang zu reduzieren. Abbildung 6.2 (b) zeigt schematisch wie S7-SPS auf diesem Wege in das Kontrollsystem eingebunden wurden. Es wurde im Rahmen dieser Arbeit zur Einbindung von S7-Steuerungen verwendet.

6.3.4. Turbo-PMAC Motorsteuerungen

Die seit kurzer Zeit eingesetzten Motorsteuerungen erfordern ein eigenes *Device-Support*-Softwaremodul. Da diese auch selbst programmiert werden müssen, um die jeweils vorgesehenen Aufgaben erfüllen zu können, sind alle weiteren Ausführungen in einem eigenen Kapitel zu finden (vgl. Kapitel 7).

6.4. Einbindung von Geräten und Subsystemen

In Abschnitt 6.3 wurde das grundsätzliche Vorgehen bei der Integration von Geräten mit unterschiedlichen Kommunikationsschnittstellen diskutiert. Dieser Abschnitt benennt nun die einzelnen Subsystem, wie z. B. *Kryogenik*, welche jeweils eine gewisse Menge von Geräten mit unterschiedlichen Schnittstellen enthalten. Es wird jeweils eine kurze Beschreibung des Systems gegeben und das Vorgehen bei der Integration, gegebenenfalls unter Verweis auf Abschnitt 6.3 diskutiert.

6.4.1. Steuerung beweglicher Elemente

Am S-DALINAC sind die Positionen unterschiedlicher Elemente durch verschiedenartige Antriebe veränderbar.

Bewegliche Elemente an Hochfrequenzsystemen

Die Aktuatoren der Abstimmrahmen der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen stellen seitens der Ansteuerung einen Sonderfall dar. Sie werden durch die Hochfrequenzregelung selbst gesteuert (vgl. Kap. 3 und [16]).

Pressluftgetriebene Elemente

Die zur optischen Strahldiagnose eingesetzten Leuchtschirme werden von Pressluftzylindern in den Strahlweg gefahren. Sie werden über Magnetventile und Relais gesteuert, da sie lediglich zwei Positionen einnehmen können müssen [79]. Eine Integration dieser Elemente in das EPICS-basierte Kontrollsystem wird derzeit im Rahmen von [63] vorgenommen.

Schlitzsysteme

Bereits zu Zeiten des DALINACs wurden energiedefinierende Schlitzsysteme verwendet. Diese wurden in Bereichen mit starker dispersiver transversaler Strahlaufweitung eingesetzt. Metallische Blenden ließen sich von beiden Seiten in den Strahlweg fahren, um Elektronen zu niedriger oder zu hoher Energie zu stoppen. Ein solches Schlitzsystem befindet sich im sogenannten 40°-Magnetsystem in der Extraktionsstrahlführung. Der S-DALINAC liefert bei geeigneter Einstellung eine

Energieschärfe, welche den Einsatz dieses Schlitzsystems als energiedefinierendes System überflüssig macht. Dennoch wurde es immer wieder zur Reduzierung des Halos verwendet, oder zur Vermeidung von negativen Auswirkungen auf aufgenommene Spektren bei globalen Energiedrifts. In diesem Fall wird der Strahl durch das Schlitzsystem zunehmend gestoppt. Es wird über eine analoge Steuerung mittels eines Synchronmotors eingestellt. Die analogen Steuersignale werden durch einen Mikrocontroller mit CAN-Bus-Schnittstelle erzeugt. Demnach gelingt die Ansteuerung über das *SocketCAN-Device-Support*-Modul.

Zwischenzeitlich wurden zusätzliche Schlitzsysteme konzipiert. Bewegliche Elemente werden hier durch Schrittmotoren angetrieben. Der Implementierung der Bewegungssteuerung und deren Einbindung in das EPICS-Kontrollsystem ist gemeinsam mit der unten beschriebenen Weglängenverstellung ein eigenes Kapitel gewidmet (siehe Kapitel 7).

Weglängenverstellung

Ursprünglich war am S-DALINAC keine verstellbare Weglänge der Strahlführung vorgesehen. Im Rahmen der ursprünglichen Kommissionierung wurde erkannt, dass eine solche Vorrichtung unverzichtbar ist [80]. Dies ist auf den energieabhängigen Phasenschlupf zurückzuführen. Um eine Veränderung der Weglänge zu erzielen, werden einige der Dipolmagnete in den Bögen der einzelnen Rezirkulationsstrahlführung verschoben. Dabei bleibt der Ablenkwinkel jedes Magneten zwar gleich, aber die im jeweiligen Bögen von den Elektronen zurückzulegende Strecke wird verändert. Als Antriebe wurden mit Netzspannung betriebene Synchronmotoren gewählt. Die rotatorische Bewegung wird über Zahnriemen übertragen und mittels Gewindespindeln in translatorische Bewegungen übersetzt. Die Positionierung kann anhand von als Spannungsteiler betriebenen Linearpotentiometern kontrolliert werden. Abbildung 6.3 zeigt schematisch den Aufbau der bestehenden Weglängenverstellung für einen einzelnen Dipol. In der ersten Rezirkulation werden zwei Dipole und in der früheren zweiten Rezirkulation drei Dipole bewegt.

Das Anfahren einer bestimmten Position ist durch die Vorgabe einer analogen Spannung möglich. Diese wird mit der von den veränderlichen Spannungsteilern bereitgestellten Spannung verglichen und gegebenenfalls eine Bewegung in die passende Richtung ausgelöst. Die Einbindung in das alte Kontrollsystem war über eine CAN-Bus-Analog-Schnittstellenplatine geschehen. Somit gelang auch die Einbindung in das EPICS-Kontrollsystem mittels des erwähnten *SocketCAN-Device-Support*-Softwaremoduls.

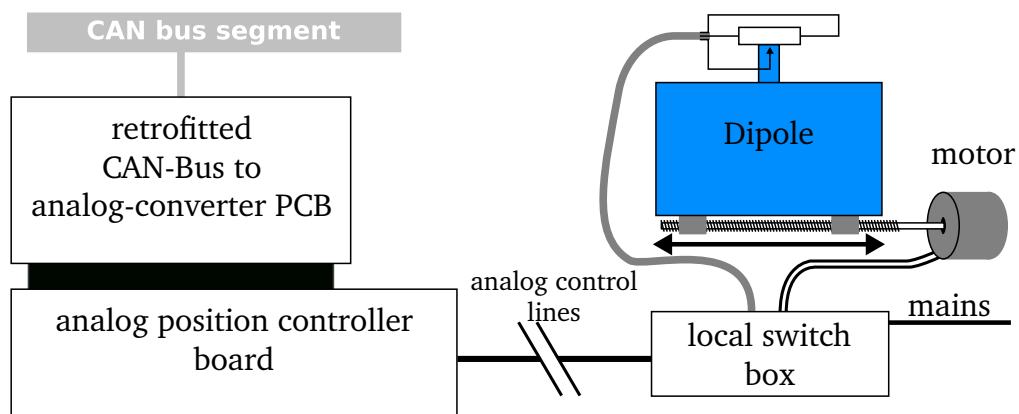


Abb. 6.3.: Aufbau der Weglängenverstellung der beiden älteren Rezirkulationen. Der Dipol wird von einem Synchronmotor über eine Gewindespindel (nicht dargestellt) verschoben. Der Schleifer eines Linearpotentiometers ist mit dem Dipol verbunden und führt bei dessen Bewegung zu einem sich ändernden Spannungsteilungsverhältnis. Eine lokale Schaltung versorgt den Synchronmotor bei Bedarf mit Netzspannung. Sie kommuniziert über analoge Signale mit der Steuerkarte außerhalb der Beschleunigerhalle. Diese bietet selbst nach außen nur ein analoges Interface. Über eine Adapterplatine lässt sie sich auch über CAN-Bus ansteuern.

Im Rahmen des Aufbaus einer dritten Rezirkulation ist auch eine Möglichkeit zur Weglängenverstellung für diese neue Rezirkulation konstruiert worden [19]. Aufgrund der Komplexität der Ansteuerung ist der Implementierung der Bewegungssteuerung und deren Einbindung in das EPICS-Kontrollsystem ein eigenes Kapitel gewidmet (siehe Kapitel 7).

Strahldiagnose

Eine weitere Klasse von beweglichen Elementen stellen Drahtscanner zur Strahlprofilmessung dar. Sie sind derzeit am S-DALINAC nicht standardmäßig im Einsatz. Ein Test eines Exemplars erfolgte im Rahmen einer Bachelor-Abschlussarbeit am normalleitenden Teil der Injektorstrahlführung [81, 82]. Dieser Versuch galt der Möglichkeit der Implementierung einer vollautomatischen Emittanzmessung durch das Kontrollsystem. Der Antrieb erfolgte über einen kommerziellen elektrischen Linearantrieb. Er wurde über eine in der Elektronikwerkstatt des Instituts für Kernphysik entwickelte Platine betrieben. Diese ist mit einer CAN-Bus-Schnittstelle ausgestattet. Der Befehlssatz ist stark an den anderer im Haus entwickelter Geräte angelehnt. Die Ansteuerung konnte dadurch innerhalb einer Bachelor-Abschlussarbeit vollständig umgesetzt werden.

6.4.2. Magnetnetzteile

Die Ansteuerung von Magnetnetzteilen wurde vollständig auf das EPICS-basierte Kontrollsystem umgestellt. Dies betrifft neben den im Institut für Kernphysik der TU Darmstadt entwickelten 7-A- und 10-A-CAN-Bus-Netzteilen auch sämtliche kommerzielle Magnetnetzteile. Zur intuitiven Bedienung wurde im Rahmen einer in Vorbereitung befindlichen Dissertation [63] ein Nachfolgemodell der seit vielen Jahren im Einsatz befindlichen Drehknopf-Bedieneinheiten entwickelt.

Eine Erweiterung gegenüber des zuletzt eingesetzten Kontrollservers zur Netzteilsteuerung stellt die Möglichkeit der Entmagnetisierung der Magnete mittels zyklischer Ummagnetisierung mit abnehmender Feldamplitude dar. Diese Funktion steht dem Operateur für sämtliche Magnete zur Verfügung, insofern diese von bipolaren Netzteilen betrieben werden. Dies trifft insbesondere auf alle Quadrupole zu. Die Implementierung erfolgte als *Endlicher Automat* (auch FSM: *Finite State Machine*). Sie ist eine Abwandlung der FSM, die im Rahmen von [16] für die Entmagnetisierung der magnetostriktiven Stellelemente der Abstimmrahmen der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen entwickelt wurde. Die Anpassungen bestanden insbesondere in der Herstellung der Kompatibilität mit den unterschiedlichen Netzteiltypen.

6.4.3. Integration des modularen Messsystems „QM07“

Primärer Einsatzzweck des modularen QM07-Messsystems ist die Messung geringer Ströme (wenige nA bis 1 mA), wie sie bei direkter Strahlstrommessung notwendig ist. Das System wurde im Rahmen von [37] am S-DALINAC eingeführt. Es sollte in diesem Sinne zunächst das Ladungsmessgerät QM80 ersetzen, enthält inzwischen aber weitergehende Funktionalität, welche auch zukünftig erweitert werden kann. Dies wird durch den modularen Aufbau ermöglicht.

Das QM07-Messsystem besteht aus einer Busplatine, einem Schnittstellencontroller zur externen Kommunikation und einer Prozessoreinheit (*processing unit*, PU). Die Signalerfassung erfolgt über bis zu zwölf zweikanalige Messkarten. Die Prozessoreinheit sammelt die Messwerte von diesen Karten und erlaubt deren Abfrage von außen. Dies kann über USB oder CAN-Bus geschehen. Das Datenformat bei Übertragung über USB geschieht in einem ASCII-Format in Klartext, mit der maximalen Abtaste von ca. 3 kHz. Es können auf diesem Wege maximal acht Kanäle gleichzeitig übertragen werden. Dagegen ist die Übertragung über den CAN-Bus immer für alle Kanäle gleichzeitig möglich, aber auf eine Abtaste von 50 Hz begrenzt.

Es kommen derzeit fünf unterschiedliche Messkartentypen am S-DALINAC zu Einsatz:

IADC Stromwandler (verschiedene Messbereiche einstellbar: 1 μ A, 100 μ A, 1 mA)

UADC Spannungswandler (Messbereich: 10 V)

HALL Für Vierletermessung z. B. an Hall-Sonden oder Pt-Elementen

DS Insb. für Positionsauswertung mit linearen Potentiometern

BLM Für Beam-Loss-Monitore

Das QM07-Messsystem war bei seiner ursprünglichen Inbetriebnahme mit einem eigenen Client-Server-System versehen worden [37]. Ein Datenaustausch mit anderen Kontrollsystemdomänen war nicht direkt möglich. Lediglich die Nutzung der für die Archivierung von Prozessdaten des Heliumverflüssigers entwickelten Datenbanktabellen war vorgesehen. Neben der mangelnden Integrierbarkeit dieses dedizierten Teilkontrollsystems ist die Wahl der USB-Schnittstelle zur Datenübertragung als schwerer Nachteil zu betrachten. Da über diese Schnittstelle lediglich acht Kanäle parallel übertragen werden können, war in dieser Lösung die dauerhafte Überwachung von maximal acht Prozessgrößen möglich. Dieser Zahl stehen die maximal 24 möglichen Eingangskanäle einer QM07-Einheit gegenüber. Auch musste der Operateur regelmäßig die Auswahl der zu übertragenden Kanäle manuell ändern, da während der Optimierung der Strahleinstellung in kurzer Zeit viele unterschiedliche Messwerte von Interesse sind.

Zentrale Anforderung für die Integration des QM07-Messsystems in das EPICS-basierte Kontrollsystem war, seitens der Operateure, die gleichzeitige Verfügbarmachung aller Messgrößen. Dies konnte nur über die CAN-Bus-Schnittstelle realisiert werden. Die dadurch verursachte Begrenzung der im Kontrollsystem verfügbaren Abtastrate von 50 Hz ist unerheblich, da die Operateure deutlich niedrigere Aktualisierungsraten für die Anzeige bevorzugen. Des Weiteren werden die den Archivtabellen zugeführten Datenraten ohnehin nochmals durch Mittelwertbildung reduziert.

Die Struktur der einzelnen Konfigurationsdateien spiegelt den physischen Aufbau des Messsystems wider. Die allgemeine Steuerung einer ganzen QM07-Einheit wird in einer einzelnen Datei beschrieben. Spezifische Umrechnungen und Einstellungen der unterschiedlichen Messkarten sind in einzelnen Konfigurationsdateien organisiert und werden entsprechend der realen Bestückung der Busplatine vom IOC geladen. Darüber hinaus stehen messkartenunabhängige Mechanismen zur Weiterverarbeitung von Daten in unkompliziert nachladbaren Dateien zur Verfügung. Diese umfassen die zeitliche Mittelung von Daten und die lineare

Umrechnung von Größen, da in vielen Fällen die eigentliche Prozessgröße nicht der gemessene Strom oder die gemessene Spannung selbst ist.

6.4.4. Integration des Alarmsystems

Das Alarmsystem des S-DALINAC fasst alle wichtigen Stör- und Warnmeldungen des Beschleunigers und dessen Infrastruktur zusammen. Die meisten Kanäle sind der Kälteanlage zuzuordnen, einige der Haustechnik (Kühlwasser, Pressluft, etc.). Eine speicherprogrammierbare Steuerung wertet diese Kanäle aus und warnt den Operateur im Kontrollraum gegebenenfalls optisch und akustisch.

Eine Auswertung der Alarmzustände über das Kontrollsystem ist wünschenswert, insbesondere, um die Zeitpunkte des Eintretens von Alarmen automatisch dokumentieren zu können. Im Rahmen von [54] war eine solche Archivierung bereits eingerichtet worden. Die Kommunikation mit der SPS erfolgte mittels der integrierten Ethernet-Schnittstelle über das Modbus/TCP-Protokoll. Die Konfiguration dieses Archivierungsdienstes war damals in der Datenbank abgelegt worden und wurde von dort beim Programmstart automatisch geladen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Auslese des Alarmsystems durch einen EPICS-IOC realisiert. Somit kann die Pflege des speziellen, nur für diese Aufgabe geeigneten Archivierungsdienst zukünftig entfallen. Darüber hinaus können die Daten des Alarmsystems nun gemeinsam mit anderen Prozessvariablen auf graphischen Benutzeroberflächen integriert werden. Die Einbindung von Modbus/TCP-Geräten in ein EPICS-basiertes Kontrollsystem war in Abschnitt 6.3.2 bereits allgemein beschrieben worden. Zur Erzeugung der Konfiguration des IOCs werden weiterhin die Datenbanktabellen, welche für den früheren Archivierungsdienst angelegt worden waren, verwendet.

6.4.5. Instrumentierung des Heliumverflüssigers

Zum Betrieb der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen des S-DALINAC müssen Temperaturen von ca. 2 K erreicht werden. Diese Temperatur lässt sich für ein solch großes System wie die Beschleunigungsstrukturen nur durch das Eintauchen in flüssiges Helium erreichen. Der Heliumverflüssiger des S-DALINAC ist auf eine Kälteleistung von 100 W ausgelegt. Dieser Wert wird zwar in der Praxis typischerweise etwas übertroffen, bietet jedoch selbst dann für viele Beschleunigerbetriebsmodi keine Reserven. Um den Heliumverflüssiger optimal betreiben zu können ist es von großer Wichtigkeit, den Zustand kontinuierlich zu überwachen. So können die Betriebsparameter automatisch archiviert werden.

Die Analyse von Fehlersituationen und die kurz- und mittelfristige Optimierung von Betriebsparametern werden dadurch deutlich vereinfacht.

Der Prozess der Kälteerzeugung und die zugehörigen Geräte sind in Abbildung 6.4 in stark vereinfachter Form skizziert. Kompressor und Pumpstand bringen die notwendige Arbeit für den Prozess auf, welcher Wärme aus dem kalten Kryostaten in die warme Umgebung transportiert. Es handelt sich um Großgeräte mit elektrischen Anschlussleistungen von jeweils ca. 100 kW. Die eigentliche Kälteerzeugung findet überwiegend in der *Coldbox* statt. Hier verrichtet das warme Heliumgas Arbeit an zwei Turbinen, wodurch es eine Abkühlung unter seine Inversionstemperatur erfährt. Die Siedetemperatur des Heliums von 4,2 K wird anschließend durch den *Joule-Thomson-Effekt* unterschritten. Eine weitere Abkühlung auf ca. 2 K wird durch die Reduzierung des Dampfdrucks auf 35 mbar durch den Pumpstand vollzogen. Größter Flüssigkeitsbehälter und gleichzeitig Teil des Beschleunigers ist der Kryostat selbst. In ihm haben die Beschleunigungsstrukturen direkten Kontakt zu flüssigem Helium.

Für *Coldbox* und *Kryostat* war ursprünglich keine ausführliche elektronische Instrumentierung vorgesehen. Noch vor Beginn der vorliegenden Arbeit wurden Sensoren nachgerüstet und im Rahmen von [54] die über ein industrielles Remote-I/O-Modul aufgenommenen Messwerte mit einer Archivierungslösung ausgestattet. Diese Funktionalität war zwar im Sinne der Prozessführung der Kälteerzeugung noch nicht vollständig, hat sich aber dennoch als wertvoll erwiesen. Bei einer Migration war hier demnach die Funktionalität mindestens zu erhalten.

Um einen sicheren Übergang von der bestehenden Lösung auf eine EPICS-basierte Software zu erreichen, wurden die bestehenden Archivierungsmechanismen zunächst nicht abgeschaltet. Alle beteiligten Geräte erlauben den Aufbau mehrerer Netzwerkverbindungen und können somit parallel von einem IOC ausgelesen werden. Andere Komponenten wurden erstmals an das Kontrollsystem angebunden und erforderten keine besondere Rücksichtnahme. Hierbei handelte es sich um kommerzielle Geräte zur Messung tiefer Temperaturen und zusätzliche Remote-I/O-Module. Ersteres ersetzt die analoge, manuell abzulesende Temperaturmessung am Beschleunigerkryostaten. Die zusätzlichen I/O-Module dienen zur Überwachung der Flüssigstickstoffanlage, welche die kryogene Abschirmung des Kryostaten kühlt, und zur indirekten Quantifizierung der durch die Ölabscheider des Kompressors rückgeführten Ölmengen. Alle fraglichen Messgeräte sind mit Modbus/TCP- oder RS485-Modbus-Schnittstellen oder seriellen Schnittstellen ausgestattet und konnten gemäß Abschn. 6.3.1 und 6.3.2 eingebunden werden. Die Konfiguration des oben angesprochenen Archivierungsmechanismus geschah ebenfalls über die Datenbank. Sie enthält alle über Modbus/TCP auslesbaren

Prozessgrößen und die nötigen Adressinformationen. Darüber hinaus sind dort für alle Größen die Umrechnungsvorschriften, zur Berechnung des numerischen Wertes in der jeweils zugrunde liegenden physikalischen Einheit, abgelegt [54]. Die Konfiguration für den nun eingesetzten EPICS-IOC erfolgt ebenfalls über diese Tabellen, so dass die Zentralisierung dieser Konfiguration nicht aufgehoben wird und trotz Parallelbetrieb der alten und der neuen Lösung kein zusätzlicher Arbeitsaufwand bei der Pflege der Konfiguration entsteht.

Pumpstand und *Kompressor* werden jeweils von einer Siemens-S7-SPS gesteuert. Die beiden Großgeräte wurden noch vor dieser Arbeit durch Dienstleister installiert. Dies beinhaltete die Steuerungen und die zugehörige Projektierung. Daher können diese nicht einfach verändert werden. Eine Möglichkeit, Daten aus den Speichern dieser Steuerungen auszulesen, war lediglich bei einem Exemplar in eingeschränkter Form vorgesehen und im Rahmen von [54] zur Archivierung verwendet worden.

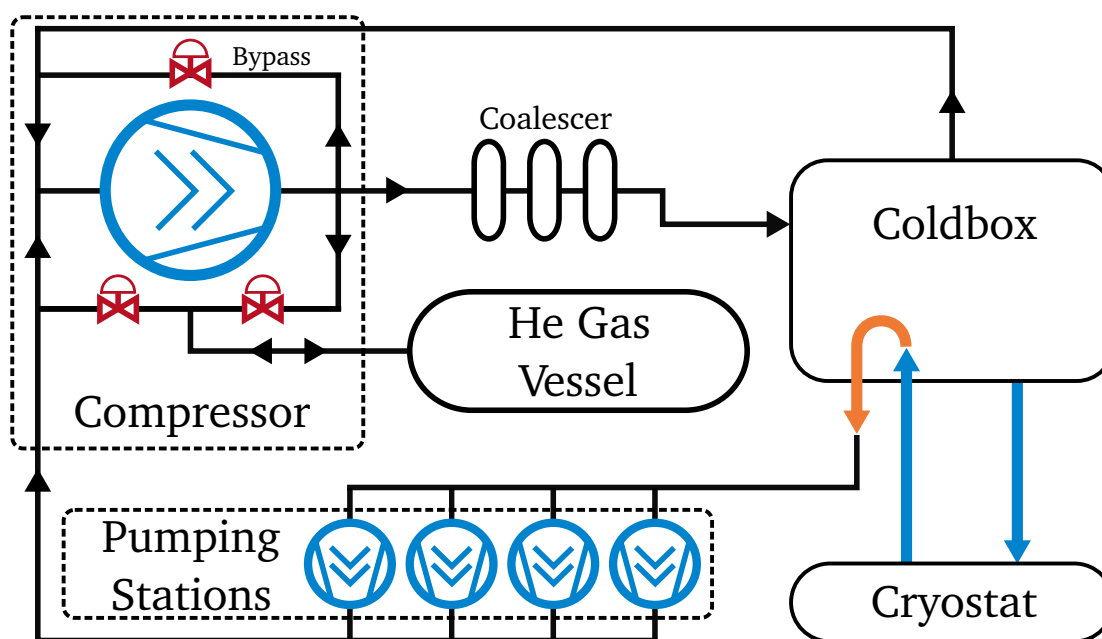


Abb. 6.4.: Stark vereinfachte Darstellung des Heliumverflüssigers. Er lässt sich in vier Hauptkomponenten unterteilen: Kompressor, Pumpstände, Coldbox und Beschleunigerkryostat. Kompressor und Pumpstand werden über speicherprogrammierbare Steuerungen gesteuert. Die Coldbox, in welcher die Flüssigkeits-erzeugung stattfindet, wird überwiegend durch nachgerüstete Sensoren über ein Industrie-I/O-Modul überwacht. Weitere Messgrößen werden durch einzelne Messgeräte bereitgestellt (z. B. Vakuumdrücke, Flüssigheliumfüllstand, etc.).

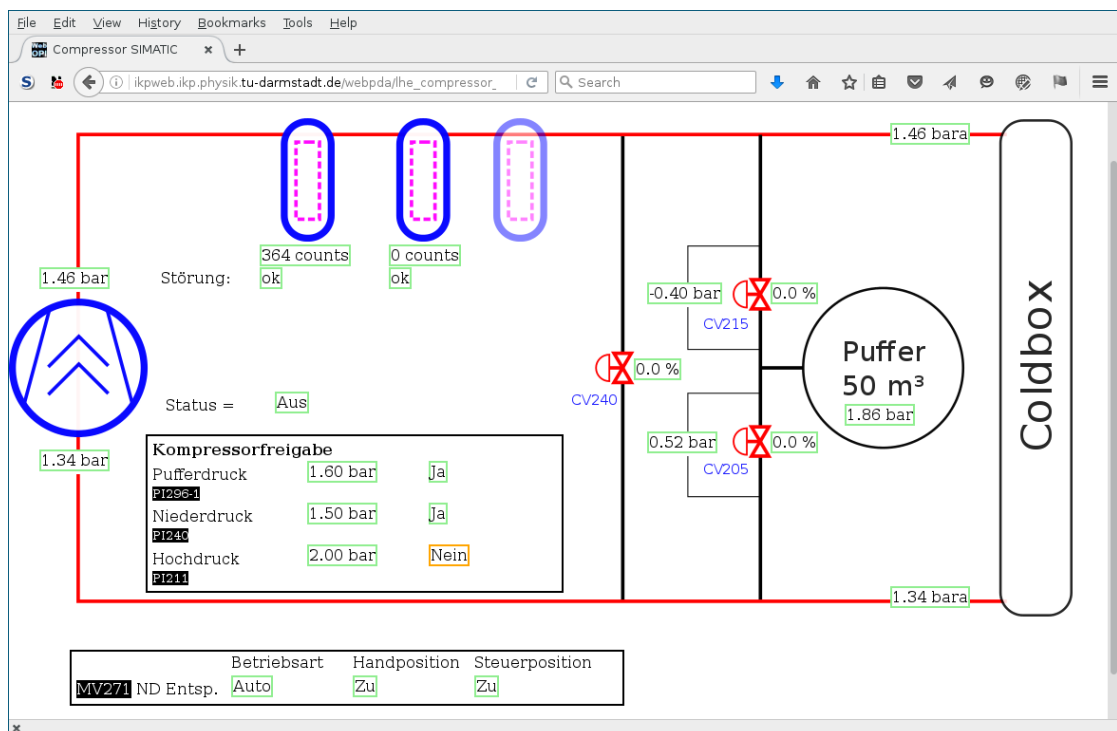


Abb. 6.5.: Screenshot einer Webbrowser-Oberfläche des Heliumverflüssigers. Gezeigt ist eine vereinfachte Darstellung des Kompressors und seiner prozesstechnischen Umgebung. Diese Oberfläche integriert Prozessvariablen, welche von der S7-SPS des Kompressors, einem digitalen I/O-Modul im Kompressorhaus und einem analogen I/O-Modul am Verflüssiger stammen. Dem Operator bleiben die unterschiedlichen Wege, auf welchen die Daten zur Darstellung gelangen, verborgen.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Integration der beiden S7-SPS in das EPICS-basierte Kontrollsystem. Über eine Ethernet-Schnittstelle werden diese Zugriffe aus der Ferne mittels des in Abschn. 6.3.3 erwähnten RFC-1006-Protokolls gesteuert. Als großer Vorteil erwies sich, dass diese Zugriffe ohne Anpassung der Projektierung der jeweiligen Steuerung möglich sind. Daher konnte auf eine kostspielige Umprogrammierung der Steuerungen durch einen Dienstleister verzichtet werden. Auch die Möglichkeit, dass auf diesem Wege neue Fehler in die Projektierung hätten gelangen können, war somit ausgeschlossen.

Abbildung 6.5 zeigt exemplarisch ein OPI, welches Daten der Kompressorsteuerung kombiniert mit Daten von diversen unabhängigen Messgeräten auf einer Oberfläche anzeigt. In der Summe sind nun einige hundert mit der Kälteerzeugung assoziierte Prozessvariablen im Beschleunigerkontrollsystem verfügbar.

6.5. Übersicht: Input/Output Controller

Dieser Abschnitt soll einen Überblick über alle im Einsatz befindlichen IOCs geben. Sie stellen in ihrer Gesamtheit sämtliche weiter oben in diesem Kapitel erläuterte Funktionalität zur Verfügung. Auf wie viele IOCs die Funktionalität aufzuspalten ist, erfolgt nach folgenden Grundsätzen:

- (1) *Virtuelle Maschinen* werden gegenüber physischen Maschinen als Plattform bevorzugt
- (2) Auf einer *Virtuellen Maschine* wird ein IOC mit genau einem *Device-Support-Modul* ausgestattet
- (3) Auf physischen Maschinen werden alle für die in der Nähe lokalisierten Geräte nötigen *Device-Support-Module* in den IOC integriert
- (4) Sowohl auf physischen, als auf *virtuellen Maschinen* wird jeweils genau ein IOC ausgeführt

Zu (1): Aufgrund der einfachen Verwaltbarkeit und kostengünstigen Verfügbarkeit werden VM als Plattform für IOCs bevorzugt. Für Geräte mit Ethernet-Schnittstelle ist dies leicht anwendbar. Um gleichzeitig die Komplexität der einzelnen IOCs niedrig zu halten, wird für jedes benötigte *Device-Support-Modul* genau ein IOC angelegt (2). Somit ergibt sich eine Trennung nach Art der Kommunikation (z. B. Modbus oder zeichenkettenbasiert) und nicht nach Funktionsdomäne (z. B. Kryogenik oder Hochfrequenzsysteme). Zusätzlich wird jeder IOC auf einer eigenen VM ausgeführt. Die erhöhte Anzahl von VMs beeinträchtigt nicht die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems, da die zugrunde liegende Hardware der eingesetzten Virtualisierungslösung redundant ausgelegt ist. Erst ein Totalausfall würde zum Ausfall der IOCs führen. Die Wahrscheinlichkeit hierfür ist aber unabhängig von der Anzahl der eingesetzten VMs.

Geräte mit Hardwareschnittstellen, die eine Datenübertragung nur über kurze Distanzen erlauben, werden von IOCs gesteuert, welche auf physischen Computern ausgeführt werden. Das trifft auf Geräte mit USB- und CAN-Bus-Schnittstellen zu. Beide Schnittstellen lassen sich zwar mit kommerziellen Geräten auf Ethernet-Schnittstellen abbilden. Im Falle von USB kann dies aufgrund der hohen möglichen Datenraten ggf. unzumutbar sein, da ein erheblicher Anteil der verfügbaren Netzwerkbandbreite benötigt werden könnte. Im Falle von CAN-Bus wurden am S-DALINAC bereits erste Ansätze verfolgt, eine Übertragung über Ethernet zu erzielen. Dies ist insbesondere dann interessant, wenn eine physische Maschine entfallen kann, die nur wenige Geräte anbindet. Auch in diesem Fall findet (4) Berücksichtigung. Jedoch wird im Gegensatz zu (2) der IOC mit allen für die vor

Tab. 6.2.: Die am S-DALINAC eingesetzten IOC's. Fett gesetzte IOC-Namen zeigen an, dass der jeweilige IOC im Rahmen dieser Arbeit entstanden ist. Kursiv gesetzte IOC-Namen zeigen an, dass dieser IOC bereits in [16] aufgesetzt worden war. Auch diese wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch weiterentwickelt.

IOC	Standort	<i>Device-Support-Module</i>
areadetectorioc	– virtuell –	areadetector
<i>canioc01</i>	Klystrenraum	tudSocketCAN
canioc02	Exp.-Halle	tudSocketCAN
<i>gun</i>	Kanonenkäfig	tudSocketCAN
modbustepioc	– virtuell –	modbus (asyn)
multiplexerioc	– virtuell –	modbus (asyn)
<i>rfcontrol</i>	Klystrenraum	tudSocketCAN, llbbcusb
s7plcioc	– virtuell –	s7nodave
sdalinacioc	– virtuell –	–
turbopmacioc	– virtuell –	tpmac2
<i>serial2ethernetioc</i>	– virtuell –	streamDevice (asyn)
simulationioc	– virtuell –	–
spektrometerioc	Messraum	tudSocketCAN, streamDevice
felcanioc	Quellenteststand	tudSocketCAN

Ort befindlichen Geräte benötigten *Device-Support-Modulen* ausgestattet (3). Dies geschieht, um die Anzahl der physischen Maschinen gering zu halten, da hier das Ausfallrisiko mit steigender Anzahl zunimmt.

Tabelle 6.2 listet die derzeit im Einsatz befindlichen IOC's auf und zeigt an, ob eine virtuelle oder physische Maschine zum Einsatz kommt und welche *Device-Support-Module* jeweils integriert sind. Zwei der aufgelisteten IOC's werden nicht direkt zur Steuerung des Beschleunigers eingesetzt. Im Rahmen von [83] wurde *felcanioc* zur Steuerung des Photoquellenteststands Photo-CATCH installiert. Das dort eingesetzte Kontrollsystem nutzt EPICS lediglich als Frontend für CAN-Bus-gesteuerte Geräte. Weitere Komponenten, wie etwa die Benutzeroberflächen, sind in LabView implementiert [84]. An den Spektrometern Q-Clam und LINTOTT geschieht die Ansteuerung der Magnetnetzteile sowie die Messung des Strahlstroms über den IOC *spektrometerioc* (vgl. [85]). Insbesondere die Verfügbarkeit der Prozessvariablen des Strahlstroms im EPICS-Kontrollsystem ist ein großer Vorteil, da er somit unkompliziert in die Bedienoberflächen im Beschleunigerkontrollraum eingebunden werden kann.

Subsystem:	Gun	Beam Transport	Beam Diagn.	QM07	Cryo-Systems	RF Systems
Year:	2011	2014	2016	2012	2015	2010
Platform:	PC – Debian Linux					
Protocol:	Channel Access					
Archive:	EPICS Archive				PDP Archive	

Abb. 6.6.: Status der Migration im Jahr 2016. Das *Channel-Access*-Protokoll erlaubt nun den Austausch von Prozesswerten zwischen allen Subsystemen. Das ältere *PDP Archiv* wird weiterhin betrieben, um die neuen Lösungen zunächst ausgiebig evaluieren zu können.

6.6. Zusammenfassung zum Status der Migration

Nach Abschluss der zur Zeit im Rahmen von [63] im Umbau befindlichen Kontrollsystemkomponenten der Strahldiagnose, kann die Migration auf ein EPICS-basiertes Kontrollsystem als nahezu vervollständigt betrachtet werden. Abbildung 6.6 zeigt, dass die zuvor getrennten Teilbereiche der Beschleunigersteuerung nun konsistent über das *Channel-Access*-Protokoll gesteuert und überwacht werden können. Als dringlichste Aufgabe bleibt die Einbindung der Ansteuerung der Lasersysteme der polarisierten Quelle. Um den Zugriff auf die in den vergangenen 10 Jahren gesammelten Prozessdaten des Heliumverflüssigers weiterhin durch die Client-Applikationen der damaligen Zeit zu ermöglichen, wurde das zugehörige Archiv bisher nicht außer Betrieb genommen. Mit der Kälteerzeugung assoziierte Daten werden weiterhin dort gespeichert. Alle sonstigen Prozesswerte werden über den in [16] installierten Mechanismus archiviert. Dieser bietet aufgrund der hohen Zahl zu archivierender Prozessvariablen (deutlich über 5000) derzeit allerdings nur eine Speicherdauer von ca. 12 Monaten, was im Falle des Verflüssigers als zu wenig betrachtet wird. Eine Lösung hierfür könnten Mechanismen zur Reduktion von älteren Datensätzen und deren Speicherung auf langsameren, aber dafür größeren Speichern sein. Als Alternative sollte die Nutzung eines Archivierers, wie zum Beispiel [86], mit effizienterer Speichernutzung evaluiert werden.

Die logische Weiterführung der bisherigen Migration auf EPICS Version 3.14 besteht in der Aktualisierung der Softwarebasis auf die von den Entwicklern inzwischen als *stabil* bezeichnete Version 3.15. Unter anderem werden einige der historisch bedingten technischen Einschränkungen in dieser Version aufgehoben, bzw. entschärft. Viele dieser Einschränkungen, z. B. die Begrenzung der Länge

von Zeichenketten auf 40 Zeichen, sind auf die in der Vergangenheit bestehende Notwendigkeit, mit Speicher sehr effizient umgehen zu müssen, zurückzuführen. Außerdem steht mit der neueren Version auch neue Funktionalität zur Verfügung. Zwei Beispiele hierfür sind die Möglichkeit des Server-seitigen Filterns von Prozesswerten und die standardmäßige Bereitstellung des Werkzeugs *msi* [87]. Letzteres ermöglicht die Vermeidung von Redundanzen in den Konfigurationsdateien, welche die Einträge der Echtzeitdatenbank eines IOCs bestimmen. Diese Umstellung war bisher bis zur Vervollständigung der Migration aufgeschoben worden. Ein Grund hierfür ist die mangelnde öffentliche Verfügbarkeit der Software der neusten Version in direkt installationsfähigen Paketformaten (vgl. hierzu auch Abschnitt 6.7).

Ein weiterer Aspekt der zukünftigen Weiterentwicklung ist die Einbindung von in der Vergangenheit noch gar nicht angesteuerten Geräten in das Kontrollsystem. Dank der nun etablierten Infrastruktur von IOCs ist hierfür in vielen Fällen ein verhältnismäßig geringer Arbeitsaufwand zu erwarten. Ein Beispiel sind Geräte älterer Bauart, die nicht mit digitalen Kommunikationsschnittstellen ausgestattet sind, aber über analoge Schnittstellen verfügen. Diese lassen sich mittels industrieller I/O-Module an das Kontrollsystem anbinden. Eine deutlich Vereinfachung der Bewertung des Zustandes des Vakuumsystems des S-DALINAC kann von einer Auslese der Ventilsteuerung erwartet werden. Während viele Druckmessstellen bereits in [16] eingebunden werden konnten, ist eine direkte Auslese der Ventilstellungen bisher nicht möglich. Inzwischen ist das System neu aufgebaut worden. Es kommt nun eine SPS zum Einsatz. Sie gleicht dem Typ, auf der das Alarmsystem realisiert ist (vgl. 6.4.4). Demnach ist der Zugriff auf diese Steuerung ebenfalls mit Modbus/TCP möglich.

6.7. Nachteile der derzeitigen Kontrollsystemstruktur

Gegenüber früheren Kontrollsystemen des S-DALINAC bringt der Einsatz eines Open-Source-Frameworks wie EPICS nicht nur eine Reduzierung des Umfangs des selbst zu pflegenden Quelltextes mit sich, sondern auch stärkere Abhängigkeit von externen Projekten.

Abbildung 6.7 zeigt die unterschiedlichen Wege, über die die Software des derzeitigen Kontrollsystems auf die jeweiligen Computer ausgeliefert wird. Der überwiegende Teil der Programme wird extern entwickelt und ist Teil einer gewöhnlichen Linux-Distribution. Am S-DALINAC wurde *Debian Linux* [88] als Basis-Distribution gewählt. Es verwendet ein Paketsystem, um Software zu installieren. Bei der Auswahl eines Paketes lassen sich automatisch auch alle Abhängigkeiten

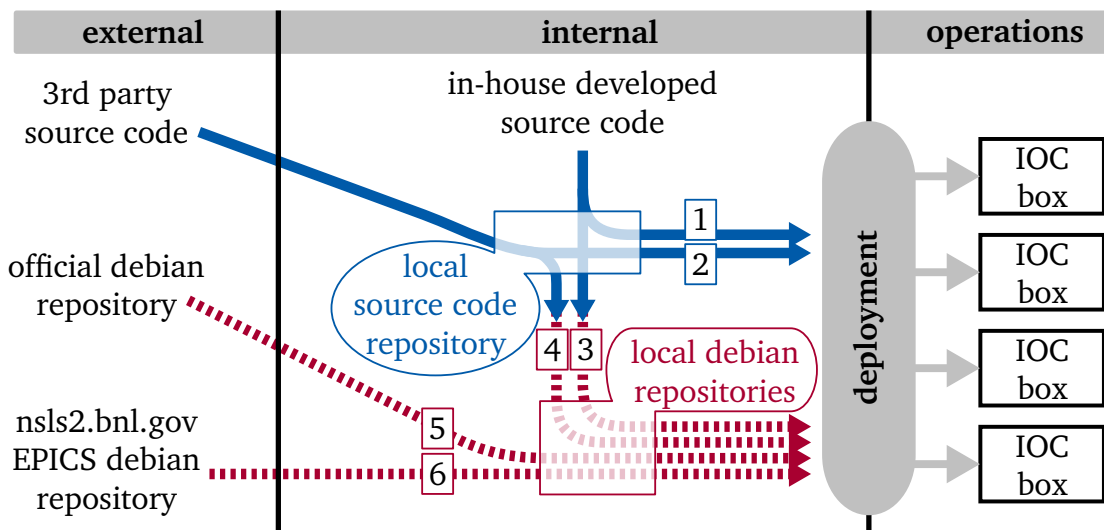


Abb. 6.7.: Struktur der Softwareverwaltung am S-DALINAC. Software wird entweder in Form von Quelltext verwaltet (durchgezogene Linien), oder als direkt installationsfähige Debian-Pakete (gestrichelte Linien). Quelltexte von Eigenentwicklungen werden im lokalen Quelltext-Versionsverwaltungssystem abgelegt. Von dort gelangen sie entweder direkt auf die zum Betrieb eingesetzten Computer (1), oder werden zunächst als Debian-Paket vorbereitet (3). Analog wird mit externen Quelltexten verfahren (2 und 4). Die Debian-Basis wird aus einem lokalen Spiegel eines offiziellen Debian-Paketquellenservers auf die lokalen Computern installiert (5). Ein Teil der EPICS-spezifischen Software wird von Kontrollsystemingenieuren der Synchrotronstrahlungsquelle NSLS-II öffentlich als Debian-Pakete bereitgestellt (6).

bestimmen und gegebenenfalls installieren. Um eine schnelle (Neu-)Installation von Computern zu erlauben, werden diese Pakete lokal gespiegelt, d. h. ein lokaler Computer hält die einzelnen Pakete vor und synchronisiert sich regelmäßig mit den offiziellen Quellen. Kurze Ausfälle der externen Paketquelle haben so auch keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Pflege der einzelnen Installationen.

Als Versionsverwaltungssystem wird am S-DALINAC *subversion* [31] verwendet. Die Quelltexte intern entwickelter Software werden darin gespeichert. Sie werden von dort von einem eigens eingerichteten Dienst in installationsfertige Debian-Pakete umgewandelt und einem lokalen Debian-Paketserver zugeführt [16]. Alternativ werden sie direkt als Quelltext bei der Installation des Zielsystems ausgeliefert und vor Ort in ausführbare Software übersetzt. Letzteres findet insbesondere dann Anwendung, wenn die entsprechende Software lediglich auf einem einzelnen Computer benötigt wird.

Externe Abhängigkeiten, die nicht im Umfang von *Debian Linux* enthalten sind, werden auf zwei Wegen importiert. Entweder werden sie als Quelltext in das lokale Versionsverwaltungssystem eingepflegt, oder, falls bereits extern als Debian-Paket vorliegend, direkt als solches in die lokale Paket-Verwaltung übertragen [16]. Die Kontrollsystemingenieure der Synchrotronstrahlungsquelle NSLS-II stellen Debian-Pakete vieler mit EPICS assoziierter Projekte öffentlich bereit [89]. Der Vorteil der Nutzung dieser Pakete ist der stark reduzierte Arbeitsaufwand. Ein massiver Nachteil stellt die mangelnde Freiheit der Versionsauswahl dar. Eine für NSLS-II als sinnvoll betrachtete Version einer bestimmten Softwarekomponente könnte für eine Neuentwicklung am S-DALINAC bereits zu alt sein. Auch die in Abschnitt 6.6 angesprochene Umstellung auf EPICS Version 3.15 blieb aus diesem Grund bislang aus.

Darüber hinaus ist auch die langfristige Verfügbarkeit dieses Repositories keinesfalls garantiert. Sollte es abgeschaltet werden oder die öffentliche Zugänglichkeit eingeschränkt werden, könnten keine Pakete mehr von dort bezogen werden. Einen unmittelbaren Einfluss auf das Kontrollsystem des S-DALINAC hätte dies nicht. Da die Pakete regelmäßig auf den lokalen Debian-Paketserver gespiegelt werden, könnten weiterhin Installationen durchgeführt werden. Aktualisierungen würden allerdings dauerhaft ausbleiben.

7. Steuerung beweglicher Strahlführungselemente

In Abschnitt 6.4.1 wurden bereits einige Systeme, die die Steuerung von Bewegungen erfordern, beschrieben. Im Rahmen der laufenden Umbauarbeiten am S-DALINAC wurden weitere bewegliche Strahlführungselemente eingebaut. Hierfür kommen programmierbare Motorsteuerungen zum Einsatz. Aufgrund der damit verbundenen Komplexität wird die Umsetzung der Anwendungen in diesem Kapitel gesondert beschrieben. Sämtliche unten ausgeführten Aspekte der Ansteuerung und Programmierung der Motorsteuerungen wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertation erarbeitet.

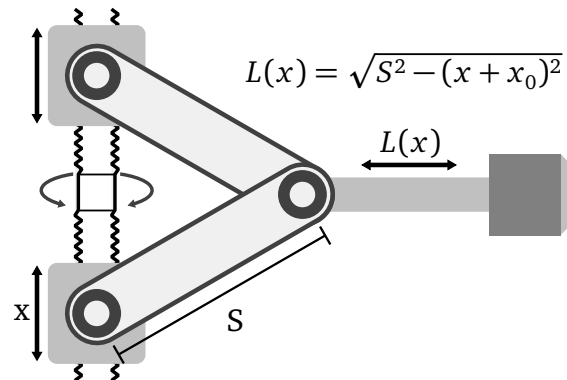
7.1. Anwendungen beweglicher Strahlführungselemente

7.1.1. Schlitzsysteme

Zusätzlich zu dem im 40°-Magnetsystem lokalisierten Schlitzsystem wurden in den letzten Jahren weitere Schlitzsysteme konzipiert. Eines wurde bereits im Injektorbogen eingebaut [22]. Es enthält zwei unabhängig transversal verfahrbare Kupferblöcke zum Abstreifen von Teilen des Elektronenstrahls. Ein zweites System befindet sich im Extraktionsbereich im Aufbau [20]. Der Aufbau gleicht prinzipiell jenem des Modells im Injektorbogen, wird jedoch insgesamt acht verfahrbare Blendenelemente umfassen. Als Antriebe wurden für beide Systeme Schrittmotoren gewählt, da sie prinzipbedingt eine sehr hohe alterungsbeständige Linearität garantieren.

Beim Aufbau des Schlitzsystems im Injektorbogen, wurde eine einfache Schrittmotorsteuerung installiert. Sie verfügt über eine serielle Schnittstelle und kann über das *asynDriver/StreamDevice-Support*-Modul angesteuert werden. Ihre intrinsischen Fähigkeiten zur Steuerung komplexer Bewegungen sind allerdings stark begrenzt. So ist sie nicht in der Lage, die nichtlineare mechanische Übersetzung des verwendeten Scherenheberantriebs (vgl. Abbildung 7.1) zu berechnen. Ein Parallelverfahren der beiden Blenden ist daher nur über das Beschleunigerkontrollsystem möglich und kann allenfalls sehr langsam durchgeführt werden. Für das im Aufbau befindliche Schlitzsystem in der Extraktionsstrahlführung ist deshalb eine leistungsfähigere Motorsteuerung vorgesehen worden. Sie wird in Abschnitt 7.2.1 beschrieben.

Abb. 7.1.: Schematische Darstellung eines Scherenheberantriebs. Die Rotation der Gewindespindel führt zu einer horizontalen Verschiebung des rechts angedeuteten Blocks. Das Gewinde ist hierzu im unteren Teil der Spindel dem im oberen Teil gegenläufig ausgeführt. Zwei Scharnierplatten übersetzen diese vertikale Bewegung unter einem nicht-linearem Zusammenhang in eine horizontale Bewegung.



7.1.2. Weglängenverstellung

Im Rahmen des Aufbaus einer dritten Rezirkulation ist auch eine Möglichkeit zur Weglängenverstellung für diese neue Rezirkulation konstruiert worden [19]. Eine wesentliche Erweiterung gegenüber den Weglängenverstellungen der älteren Rezirkulationsstrahlführungen ist die Möglichkeit der Weglängenveränderung um eine volle Hochfrequenzwellenlänge. Um dies zu erreichen, wurden beide Bögen der neuen Rezirkulation mit beweglichen Ablenkmagneten ausgestattet. Der Strahl wird in diesen Bögen jeweils viermal um 45° abgelenkt. Abbildung 7.2 zeigt vereinfacht, wie jeweils zwei Ablenkmagneten und zwei Quadrupolmagnete verschoben werden. Die einzelnen Magnete werden jeweils durch zwei Linearlager geführt. Als Antriebe sind ebenfalls Schrittmotoren gewählt worden. Gewindespindeln unter den Ablenkmagneten wandeln die rotatorische Bewegung der Elektromotoren in eine translatorische Bewegung um.

Der zwischen den Quadrupolmagneten lokalisierte Membranbalg ermöglicht die Anpassung der Länge des evakuierten Strahlrohres an die Veränderung der Strecke zwischen den Ablenkmagneten. Fällt einer der beiden Antriebe aus, ist dieser Balg gefährdet, da er nicht für starke Scherungen ausgelegt ist. Geringe Scherbelastungen kann er reversibel aufnehmen, stärkere Scherungen führen zu dauerhaften Verformungen; im schlimmsten Fall könnte er so seine Dichtigkeit verlieren. Da die Weglängenverstellung genau dann bedient wird, wenn ein Elektronenstrahl die Rezirkulation durchläuft, wären die kalten Beschleunigungsstrukturen in diesem Szenario der unkontrolliert eindringenden Luft ausgesetzt. Eine Sicherung gegen ein solches Ereignis war somit eine feste Anforderung an das System. Die alten Weglängenverstellungen sind gegen diesen Fall nicht abgesichert.

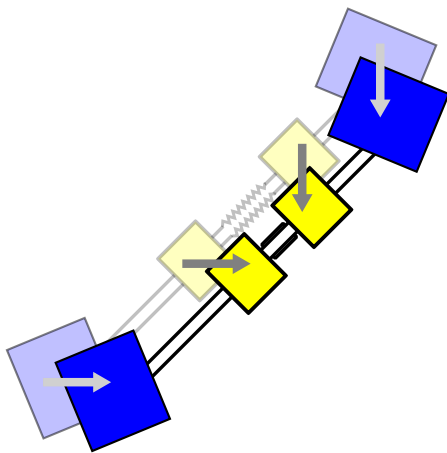


Abb. 7.2.: Bewegung der Dipol- und Quadrupolmagnete in einem Bogen der neuen Rezirkulationsstrahlführung. Unter den Dipolmagneten ist jeweils eine Gewindespindel montiert. Die Quadrupolmagnete werden über die miteinander verbundenen Grundplatten mitbewegt. Der Membranbalg zwischen den Quadrupolmagneten erlaubt die Verkürzung dieser Strecke. Fällt aufgrund einer Störung einer der Antriebe aus, so kann dieser Balg durch die auftretende Scherbelastung beschädigt werden. Die Steuerung muss diesen Fall sicher erkennen.

7.2. Implementierung der Motorsteuerung

7.2.1. Hardware

Bei der Auswahl einer geeigneten Motorsteuerung wurden auch die zukünftige Umstellung bestehender Systeme und die Einbindung derzeit noch nicht geplanter Systeme unter Einsatz der gleichen Steuerung berücksichtigt. Einfache Steuerungen bieten meist nur einen festen Befehlssatz und müssen für nicht-triviale Anwendungen von außen gesteuert werden. Programmierbare Geräte mit integriertem Computer sind hier flexibler einsetzbar.

Der für die oben beschriebenen Anwendungen beschaffte Typ (*Delta Tau, Geo Brick LV; Integrated Controller-Amplifier*) enthält einen echtzeitfähigen Computer. Abbildung 7.3 stellt den Aufbau des Geräts schematisch dar. Der Prozessor kann neben Programmen zur direkten Motorsteuerung, sogenannten *motion programs*, auch die als *PLC* bezeichneten Programme zur übergeordneten Steuerung ausführen. Letztere können Aufgaben übernehmen, die klassischerweise häufig auf SPS (engl. PLC) implementiert werden. Hierfür steht eine kleine Anzahl von digitalen Ein- und Ausgängen zur Verfügung.

An der Motorsteuerung können neben Schrittmotoren auch Gleichstrommotoren und bürstenlose Motoren betrieben werden. Sogenannte *Anwendungsspezifische integrierte Schaltungen* (engl. *Application Specific Integrated Circuits, ASICs*) erzeugen die für den jeweiligen Motortyp erforderlichen elektrischen Signale. Die Endstufen zur Bereitstellung der entsprechenden Leistung sind ebenfalls integriert. An eine Steuerung können je nach Ausführung vier oder acht Motoren beliebigen Typs angeschlossen werden. Eingänge für die Auswertung von Drehgebern sind

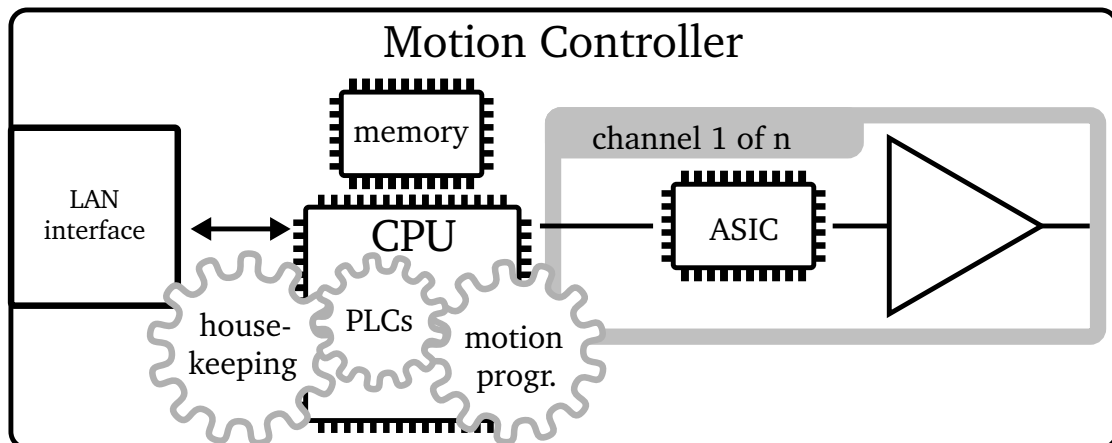


Abb. 7.3.: Schematischer Aufbau eines der eingesetzten Spezialcomputer für die Steuerung von Bewegungen. Eine CPU führt neben Verwaltungsaufgaben Software unterschiedlichen Typs aus. Sogenannte PLC-Programme übernehmen Aufgaben, die häufig auf SPS (engl. PLC) implementiert werden. Sie werden parallel zu den anderen Programmen ausgeführt. Für die in vielen Anwendungen strengen Echtzeitanforderungen unterliegende Steuerung der Bewegungen selbst lassen sich spezielle Bewegungsprogramme (*motions programs*) definieren. Integrierte Verstärker erlauben den direkten Anschluss von Motoren.

ebenfalls vorhanden (diese kommen bei den hier beschriebenen Anwendungen nicht zum Einsatz).

Für die Anwendung der Weglängenverstellung kommt eine 4-Kanalsteuerung mit vier Schrittmotoren zum Einsatz. Die Bewegung der Motorachsen wird über Zahnriemen auf die Spindel übertragen. Jede Achse wird durch zwei Begrenzungsschalter gegen zu weites Verfahren gesichert. Das Auslösen eines solchen Schalters stellt bereits einen Fehlerfall dar, da die Steuerung softwareseitig bereits eine Limitierung der Bewegung vornimmt. Ein Referenzschalter dient zur Wiedererlangung der Kenntnis der Position, z. B. nach einem Stromausfall. Zur Absicherung gegen ein zu starkes Scheren des Balges zwischen den Quadrupolmagneten (vgl. Abb. 7.2) wurden weitere Schalter installiert. Sie sind so platziert, dass sie ausgelöst werden, sobald eine leichte Scherung auftritt.

7.2.2. Programmierung der Weglängenverstellung

Im Folgenden werden überwiegend die allgemeinen Aspekte der im Rahmen dieser Arbeit für die Motorsteuerung erstellten Software und Konfiguration erläutert.

Tab. 7.1.: Übersicht über die zur Steuerung der Weglängenverstellung im Rahmen dieser Arbeit entwickelten *PLC*-Programme.

PLC	Beschreibung
1	Initialisierung bei Systemstart
2	Reset einzelner Motoren nach Fehlersituationen
3	Manuelles Verstellen des 1. Bogens
4	Manuelles Verstellen des 2. Bogens
5	Ausgaben auf GPIO tätigen
6	Sicherung: Vergleich der Stromaufnahme der Motoren
8	Zeitgesteuerte Verstärkerabschaltung nach Stop (1. Bogen)
9	Zeitgesteuerte Verstärkerabschaltung nach Stop (2. Bogen)
10	Endlicher Automat für Referenzfahrt (1. Bogen)
11	Endlicher Automat für Referenzfahrt (2. Bogen)

Bewegungskommandos werden nicht direkt von den Motoren ausgeführt. Stattdessen werden Bewegungen in abstrakten *Koordinatensysteme* ausgeführt. Die einzelnen Motoren sind den Achsen eines Koordinatensystems zugeordnet. Empfängt die Steuerung ein Bewegungskommando, beispielsweise eine lineare Bewegung zwischen zwei Punkten in einem 3-dimensionalen Koordinatensystem, so berechnet sie in Echtzeit die Bewegungen, welche die einzelnen Motoren ausführen müssen. Dabei werden die Bewegungen zu jeder Zeit koordiniert, d. h. es werden nicht nur Start- und Zielpunkt einer Bewegung kontrolliert, sondern auch die sie verbindende Trajektorie. Für die Weglängenverstellung sind jeweils die beiden Motoren einer Weglängenverstellung der X-Achse eines *Koordinatensystems* zugeordnet. Eine Bewegung auf dieser Achse führt dann immer zur synchronen Bewegung der entsprechenden Motoren.

Das von außen beeinflussbare Verhalten der Steuerung wird vollständig durch die erwähnten *PLC*-Programme bestimmt. Tabelle 7.1 listet diese auf. Die Programme 1 und 2 dienen einfachen Verwaltungsaufgaben. Eine Möglichkeit, die Magnete vor Ort durch physische Schalter bewegen zu können, und einfache Statusanzeigen werden durch die Programme 3 – 5 gegeben. Sie aktivieren ihrerseits gegebenenfalls geeignete Bewegungsprogramme.

Programm 6 implementiert eine softwareseitige Sicherung gegen die beschriebene Scherungsbewegung. Hierzu werden die Ströme der beiden entsprechenden Motoren miteinander verglichen. Nehmen sie stark unterschiedliche Ströme auf, z. B. infolge eines Kabelbruchs an einem der Motoren, wird die Bewegung sofort gestoppt.

Programm 8 und 9 schalten die Endstufen von inaktiven Motoren nach 1 s aus.

Dies geschieht zur Vermeidung von elektromagnetischer Einkopplung von Störungen in Signalkabeln. Da am S-DALINAC Ströme bis hinunter in den Bereich weniger nA gemessen werden müssen, kann die Einstreuung durch die stromstarken, oberwellenreichen PWM-Signale der Motorendstufen auf den entsprechenden Messleitungen problematische Ausmaße annehmen. An vielen Stellen ist aufgrund baulicher Einschränkungen, zum Beispiel dem Vorhandensein nur eines Wanddurchbruches zwischen Beschleuniger- und Experimentierhalle, praktisch nicht zu vermeiden, dass solche Kabel über viele Meter parallel verlaufen. Die Programmierbarkeit der Motorsteuerung erlaubt, die Abschaltung nach einer Bewegung automatisch vorzunehmen. Bewegungsbefehle führen automatisch zu einer Reaktivierung aller benötigten Endstufen. Die Motorwindungen werden bei Abschaltung der Endstufen automatisch kurzgeschlossen. Dadurch entwickeln sie ein passives Haltemoment, welches verhindert, dass durch geringe äußere Kräfte eine Drehung der Motorachse geschieht. Für die Weglängenverstellung ist dies zweitrangig, da bereits die Reibung der Gewindespindel eine Bewegung verhindert. Bei den unterschiedlichen Mechanismen der Schlitzsysteme ist dies nicht immer garantiert.

Programme 10 und 11 dienen zur Durchführung von Referenzfahrten. Eine Referenzfahrt erlaubt die Wiedererlangung der Kenntnis der momentanen Position, falls diese aufgrund eines Stromausfalls verloren ging. Zusätzlich zu den Begrenzungsschaltern sind hierzu an den beiden beweglichen Dipolen eines Bogens präzise Referenzschalter installiert. Sie befinden sich fast am unteren Ende des erlaubten Bewegungsspielraums. Um die Position des Systems wiederholt zu erfassen, muss ein Referenzschalter immer aus der gleichen Richtung angefahren werden. Abbildung 7.4 stellt die unterschiedlichen Startsituationen dar. Zu Beginn einer Referenzfahrt ist nicht bekannt in welcher Richtung die Referenzschalter zu finden sind. Zunächst wird solange in negativer Richtung gefahren bis der Referenzschalter des ersten Dipols gefunden wurde oder der untere Begrenzungsschalter auslöst. Im letzteren Fall wird der Referenzschalter anschließend in positiver Richtung gesucht. Anschließend wird der Referenzschalter zuerst durch eine entsprechende Bewegung wieder gelöst und schließlich mit geringer Geschwindigkeit von unten angefahren. Während dieser Fahrten muss der Motor des zweiten Dipols allen Bewegungen des Motors des ersten Dipols folgen. Da sich die beiden unterschiedlichen Referenzschalter mechanisch nicht so genau platzieren lassen, dass eine simultane Auslösung erfolgt, muss die Prozedur für den zweiten Referenzschalter wiederholt werden. Die ermittelten Positionen der einzelnen Schalter unterscheiden sich demnach im Allgemeinen. Der Unterschied wird einmalig bestimmt und anschließend als Konstante betrachtet. Fällt er bei einer späteren Referenzfahrt anders aus, muss davon ausgegangen werden, dass die Magnete sich gegeneinander verschoben haben. Dies erzwingt eine Überprüfung

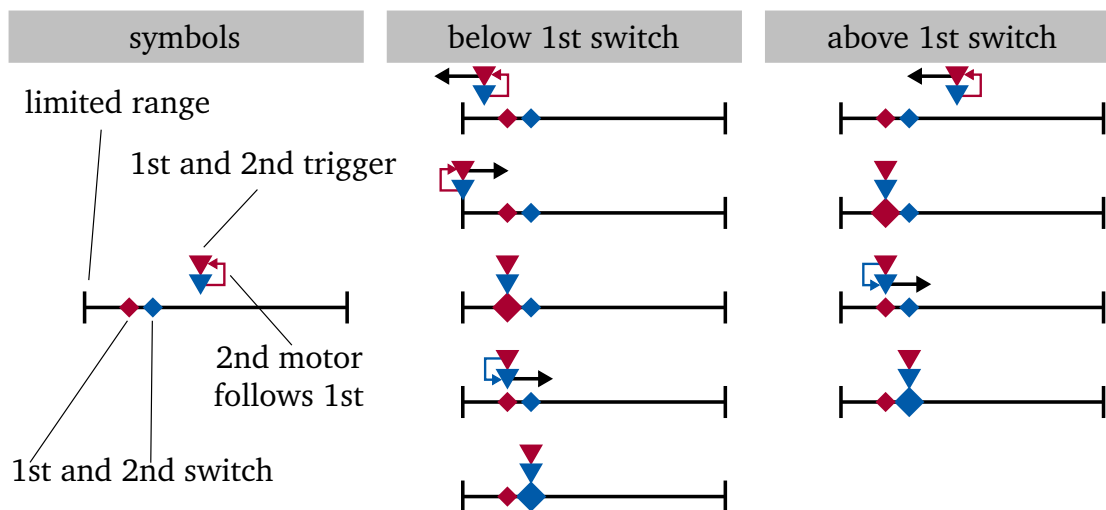


Abb. 7.4.: Mögliche Ausgangssituationen einer Referenzfahrt. Zunächst wird immer in negativer Richtung (hier links) gesucht. Löst der untere Endschalter aus, wird die Bewegungsrichtung geändert. Nach Auslösen des ersten Schalters wird der zweite Schalter angefahren. Letzterer kann, anders als in dieser Darstellung suggeriert, auch unterhalb des ersten Schalters liegen.

vor Ort und gegebenenfalls eine manuelle Korrektur.

Programme 10 und 11 implementieren jeweils einen *endlichen Automaten* (engl. *Finite State Machine*, FSM), der die beschriebene Prozedur ausführt. Er ist weiterhin in der Lage Fehlerzustände zu erkennen. Die Motorsteuerung bietet ein einfaches Kommando zur Auslösung einer Referenzfahrt über das Kontrollsystem an. Abbildung 7.5 zeigt ein Diagramm der FSM. Die *passiven Zustände* stehen für eine abgeschlossene oder fehlgeschlagene Referenzfahrt. Die *aktiven Zustände* stehen für eine in Ausführung befindliche Referenzfahrt. Sollten sich einzelne Schritte nicht erfolgreich durchführen lassen, z. B. wenn ein Referenzschalter überhaupt nicht gefunden wird, geht die FSM in einen Fehlerzustand über.

7.3. Integration in das Kontrollsystem

Die Kommunikation mit der Motorsteuerung erfolgt über die eingebaute Ethernet-Schnittstelle. Das verwendete Protokoll ist vom Hersteller dokumentiert und wurde im Open-Source-Projekt TPMAC2 [90] als *Device-Support-Modul* für EPICS implementiert. Es erlaubt eine vielfältige Nutzung der Funktionalität der Motorsteuerung. Für die vorliegenden Anwendungen wurde ein einfacher Ansatz

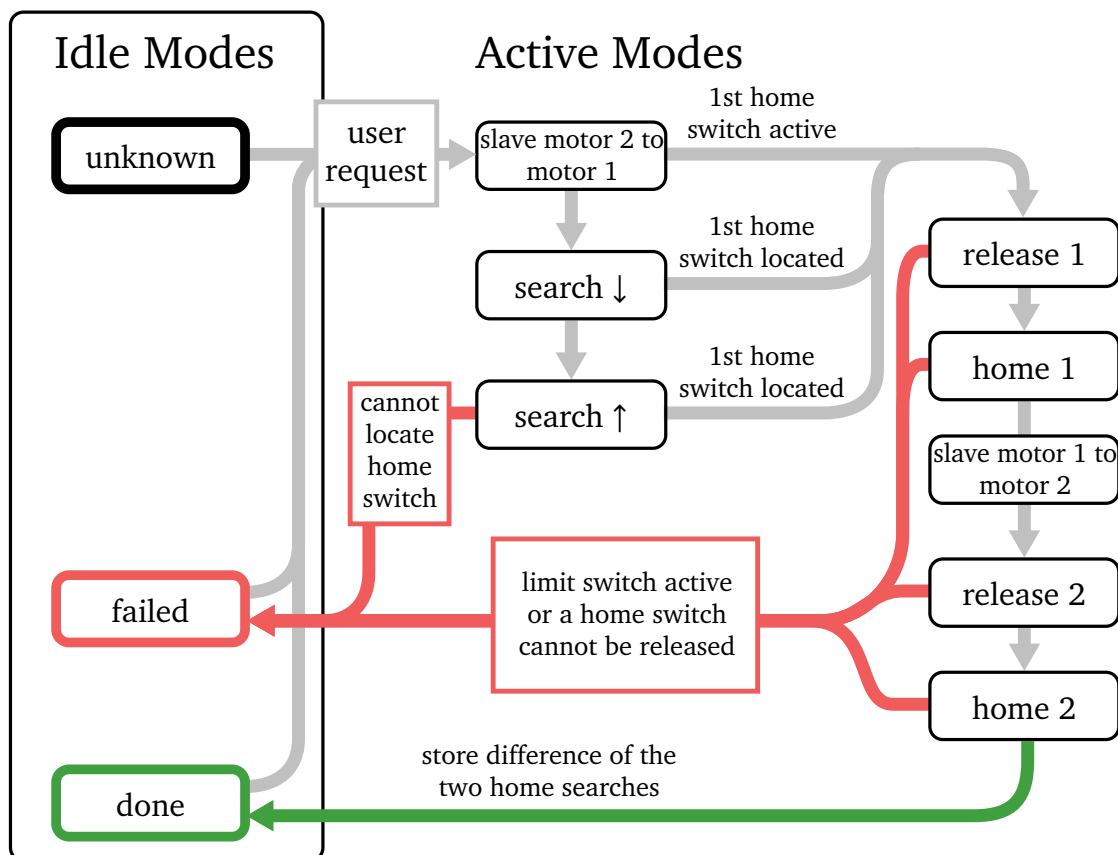


Abb. 7.5.: Endlicher Automat (FSM) zur Durchführung einer koordinierten Referenzfahrt. Nähere Erläuterungen finden sich im Haupttext.

gewählt. Das Beschleunigerkontrollsystem schreibt hierzu lediglich Vorgabewerte und Bewegungsanfragen in den Speicher der Steuerung. Die eigentliche Auslösung von Bewegungsvorgängen erfolgt dann von den auf der Steuerung selbst ausgeführten PLC-Programmen. Statusinformationen werden vom Beschleunigerkontrollsystem ebenfalls über den Speicher ausgelesen.

7.4. Inbetriebnahme und Ausblick

Die Inbetriebnahme der Weglängenverstellung geschah unter wiederholten Positionsmessungen mittels geodätischer Methoden (siehe [19]). Es konnte eine Reproduzierbarkeit der Positionierung von besser als 0,1 mm abgeschätzt werden. Zurückzuführen ist dies auf die hochgenaue Gewindespindel. Sie weist ein sehr

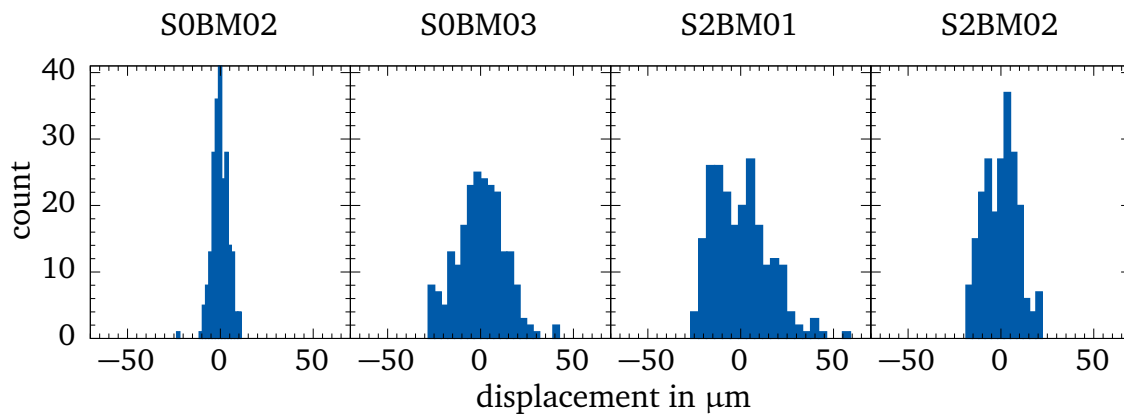


Abb. 7.6.: Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Positionierung anhand wiederholten Anfahrens der Referenzschalter. Die vollen Breiten der einzelnen Verteilungen sind kleiner als 0,1 mm und entsprechen somit der geforderten Positionierungsgenauigkeit für die Elemente der Strahloptik.

geringes Spiel auf. Auf die Implementierung von Kompensationsmethoden in der Software wurde daher vollständig verzichtet.

Abbildung 7.6 zeigt die Ergebnisse dieser Überprüfung von der Reproduzierbarkeit der Nullposition anhand von Referenzschaltern. Hierzu wurden diese wiederholt angefahren und die Unterschiede in der zurückzulegenden Anzahl der Schritte aufgenommen. Die auf diesem Wege erzielte Feststellung der Positionierung ist mit einer Reproduzierbarkeit von besser als 0,1 mm ebenfalls mehr als hinreichend genau für den vorliegenden Zweck.

Die Inbetriebnahme des neuen Schlitzsystems in der Extraktionsstrahlführung steht derzeit noch aus. Gegenüber der Weglängenverstellung ist die koordinierte Bewegung mehrerer Achsen hier nicht zwingend notwendig. Die Modellierung der Kinematik der Scherenheberantriebe in der Motorsteuerung ist aber wünschenswert. Die Umsetzung dessen ist noch in Arbeit.

Mittelfristig sollten alle Schlitzsysteme und Weglängenverstellungen auf das neue System umgestellt werden. Dies bietet neben einer Vereinfachung aufgrund der Vereinheitlichung auch eine erhöhte Sicherheit bei der Weglängenverstellung.

8. Übergeordnete Kontrollsystemfunktionalität

In Kapitel 6 wurde die Vereinheitlichung der Ansteuerung sämtlicher Subsysteme des S-DALINAC durch ein EPICS-basiertes Kontrollsystem beschrieben. Dies macht die Bereitstellung allgemeiner, d. h. nicht einzelnen Geräten zuzuordnender Funktionalität attraktiv. Da auf alle Prozessvariablen über das *Channel-Access*-Protokoll zugegriffen werden kann, lassen sich solche Dienste dank Abschluss der Migration nun zentral installieren. Als Beispiel soll an dieser Stelle der Archivierungsdienst genannt werden. Er war im Rahmen von [16] konzipiert und installiert worden [91]. Er kann für alle Prozessvariablen gleichermaßen eingesetzt werden, so dass der parallele Betrieb von Archivierungsmechanismen für unterschiedliche Subsysteme prinzipiell nicht nötig ist. Tatsächlich sind derzeit noch zwei Archivierungsmechanismen im Einsatz, da die dauerhafte Archivierung mit der in [16] eingerichteten Lösung nicht effizient möglich ist.

8.1. Verteilung der Konfiguration

8.1.1. Motivation

Das EPICS-basierte Beschleunigerkontrollsystem des S-DALINAC ist ein *verteiltes Kontrollsystem*. Mehrere Computer dienen dabei zur Ansteuerung je einer Teilmenge von Geräten. Das *Channel-Access*-Protokoll erlaubt dennoch transparenten Zugriff auf die einzelnen Prozessvariablen, d. h. das Wissen darüber, welcher Computer welche Prozessvariable verwaltet, ist nicht notwendig; vgl. 5.1.2. Dieser Ansatz skaliert mit der Anzahl der anzusteuernenden Geräte, da das Kontrollsystem unkompliziert durch zusätzliche Computer zur Ansteuerung erweitert werden kann, falls die Reserven auf den vorhandenen Computern hierfür nicht ausreichen sollten. Zur Vereinfachung der Wartung kann außerdem unterschiedliche Funktionalität auf unterschiedliche Computer aufgeteilt werden, ohne dass die Auflösung von Prozessvariablen-Bezeichnern sich verkompliziert (vgl. Abschnitt 6.5).

Aufwand entsteht durch eine solche Architektur überwiegend durch den Umgang mit der Konfiguration der einzelnen IOCs. Diese ist durch die verteilte Implementierung der Geräteansteuerung ebenfalls auf verschiedene Computer verteilt. Die Konfiguration eines IOCs umfasst unterschiedliche Aspekte. Solche, die bestimmen, welche Softwarekomponenten Teil eines IOCs sein sollen, werden an dieser Stelle nicht weiter diskutiert. Sie werden im Quelltext-Versionsverwaltungssystem

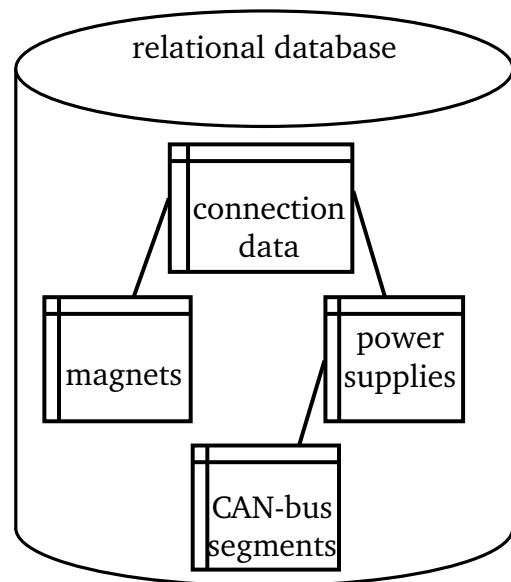
des S-DALINAC verwaltet. Solche, die bestimmen, wie die über die jeweilige Schnittstelle ausgetauschten Daten zu interpretieren sind, müssen nochmals unterschieden werden. Zum einen muss der Entwickler für jeden Gerätetyp mindestens eine sogenannte *Template*-Datei erstellen. Diese Textdatei muss eine bestimmte Formatierung aufweisen und beschreibt konkret, wie die einzelnen Datenpakete die Information über den Zustand eines Gerätes kodieren. Sie wird manuell erstellt, da das gewünschte Verhalten der Repräsentation eines Gerätes im Beschleunigerkontrollsystem nicht aus anderen maschinenlesbaren Quellen erzeugt werden kann. Da in der Regel mehrere Exemplare eines Gerätes durch das Kontrollsystem angesteuert werden sollen, werden in diesen *Template*-Dateien Platzhalter für gewisse Einträge eingesetzt. Beispiele sind die Präfixe der Namen der einzelnen Prozessvariablen und die für die Kommunikation notwendigen Adressen. Beim Starten eines IOC werden die *Template*-Dateien gemeinsam mit einer Liste von Ersetzungen für die einzelnen Platzhalter geladen und eine entsprechende Anzahl von Instanzen in der Echtzeitdatenbank des IOC erzeugt. Die *Template*-Dateien werden ebenfalls im Quelltext-Versionsverwaltungssystem abgelegt. Für die einzelnen Platzhalter einzusetzende Zeichenketten müssen beim Start des IOC ebenfalls in Textdateien vorliegen. Sie können prinzipiell ebenfalls im Quelltext-Versionsverwaltungssystem abgelegt werden. Für einzelne Geräte beziehungsweise IOCs, die eine geringe Anzahl sehr unterschiedlicher Geräte verwalten, ist dies meist auch der Fall.

Insbesondere für IOCs, welche CAN-Bus-Netzteile steuern, ist hingegen die maschinelle Erzeugung dieser Dateien wünschenswert. Die Menge der Netzteile dieses Typs stellt den größten Einzelposten der anzusteuernenden Geräte dar. Der naheliegende Ansatz zur Handhabung der Konfiguration sind deren zentrale Speicherung und ein geeigneter Verteilungsmechanismus. Die Speicherung solcher Daten erfolgt am S-DALINAC in einer zentralen relationalen Datenbank (siehe Abschnitt 8.1.2). Die Verteilung wird über Computerprogramme durchgeführt. In [16] war die Erzeugung der Konfigurationsdateien für die Netzteile der Frequenzsteller der Beschleunigungsstrukturen bereits maschinell erfolgt. Die unten vorgestellte Lösung stellt eine Neuentwicklung im Rahmen dieser Arbeit dar. Sie hatte eine Verallgemeinerung zum Ziel. Für Geräte, von welchen nur sehr wenige oder gar einzelne Exemplare im Einsatz sind, wird der Aufwand für die Einrichtung maschinell erzeugter Konfiguration gegenüber einer manuellen Verwaltung als unverhältnismäßig eingestuft.

8.1.2. Zentrale Datenbank

Am S-DALINAC steht die in [54] aufgebaute relationale Datenbank unter anderem zur Aufnahme und strukturierten Ablage von Konfigurationsdaten zur Verfügung. Daten zu den vorhandenen Netzteilen werden in einer Tabelle gespeichert, Daten zu den am Beschleuniger verbauten Magneten in einer anderen. Über weitere Tabellen lassen sich die mit einem Magneten verbundenen Netzteile ermitteln (vgl. Abbildung 8.1). Dabei können nicht nur Eins-zu-eins-Zuordnungen abgebildet werden. Auch die Versorgung eines Magneten durch mehrere parallel geschaltete Netzteile und die Versorgung von in Reihe geschalteten Magneten lassen sich erfassen. Die Gestaltung der Tabellen erfolgte damals unabhängig von konkreten Anwendungen.

Abb. 8.1.: Vereinfachtes Schema zur Speicherung der Konfiguration von Magnetnetzteilen. In einer Tabelle sind alle elektrischen Lasten (mehrheitlich Magnete) aufgelistet. Sie enthält beispielsweise die elektrische Belastbarkeit der einzelnen Geräte. In einer anderen Tabelle werden die einzelnen Netzteile geführt. Weitere Tabellen (hier als einzelne Tabelle *Connection Data* dargestellt) stellen die Verkabelung der einzelnen Netzteile und Magnete dar. Über eine Verknüpfung der Einträge mit den Daten der Tabelle *CAN-bus segments* lassen sich alle für die Ansteuerung relevanten Daten ermitteln.



8.1.3. Maschinelle Erzeugung von IOC-Konfigurationsdateien

Die in der zentralen Datenbank gespeicherten Inhalte lassen sich über die Abfragesprache SQL abrufen. Sie erlaubt die Daten aus unterschiedlichen Tabellen zu kombinieren und zu filtern. Über eine gewöhnliche Programmiersprache können diese Abfragen ausgelöst und die Ergebnisse weiterverarbeitet werden, um die für die IOCs geeigneten Konfigurationsdateien zu erzeugen.

Anforderungen an die maschinelle Erzeugung der Konfiguration

Die Bibliothek sollte sich einfach nutzen lassen, d. h. ohne Kenntnis der Interna, und nachträglich ohne Programmieraufwand mit neuen Gerätetypen und Datenbanktabellen verwendbar sein.

Die Implementierung sollte in einer dynamisch typisierten Skriptsprache erfolgen. Solche Sprachen werden interpretiert, das heißt erfordern keine Kompilierung und sind daher für Entwickler sehr einfach zu handhaben. Der Verzicht auf statische Typisierung ermöglicht eine sehr kompakte Formulierung des Programmablaufs. Auch die Nutzung der Bibliothek erfordert lediglich das Vorhandensein eines passenden Interpreters. Entwickler können außerdem mit geringem Aufwand die Funktionalität testen.

Flexibilität war in Bezug auf die Typen der zu konfigurierenden Geräte gefordert. Die Bibliothek sollte ohne Veränderungen des Quelltextes für die Erzeugung von Konfigurationseinträgen für weitere Geräte nutzbar sein. Notwendig sein sollte – da unvermeidbar – lediglich die Anpassung der SQL-Abfragen. Hierzu waren diese vom eigentlichen Quelltext der Bibliothek zu trennen.

Implementierung der maschinellen Erzeugung der Konfiguration

Als Skriptsprache wurde Python gewählt, da diese Sprache eine hohe Verbreitung aufweist und Interpreter standardmäßig für alle Linux-Distributionen verfügbar sind. Die SQL-Abfragen werden in jeweils einer einzelnen Datei abgelegt und erfordern keinerlei Kenntnis über den internen Aufbau der in Python geschriebenen Bibliothek. Es können somit neue Abfragen von Entwicklern ergänzt werden, auch wenn diese sich lediglich mit der Datenbank auskennen. Auch die Erzeugung von Ersetzungslisten für neue *Template*-Dateien ist ohne Veränderung an der Bibliothek möglich. Diese ermittelt automatisch alle zu ersetzenden Platzhalter und ordnet durch Vergleich der Namen von Platzhaltern und den Spaltenbezeichnungen des Resultats der Datenbankabfrage die entsprechenden Werte zu. Anschließend werden die so gewonnenen Einträge in Textform ausgegeben. Die Formatierung entspricht der vom IOC geforderten Form. Abbildung 8.2 stellt den gesamten Prozess schematisch dar.

8.1.4. Einsatz der maschinellen Erzeugung von Konfigurationsdateien

Der entwickelte Mechanismus kommt zur Konfiguration sämtlicher am S-DALINAC eingesetzter, über CAN-Bus gesteuerter Netzteile zum Einsatz. Im Rahmen von [63]

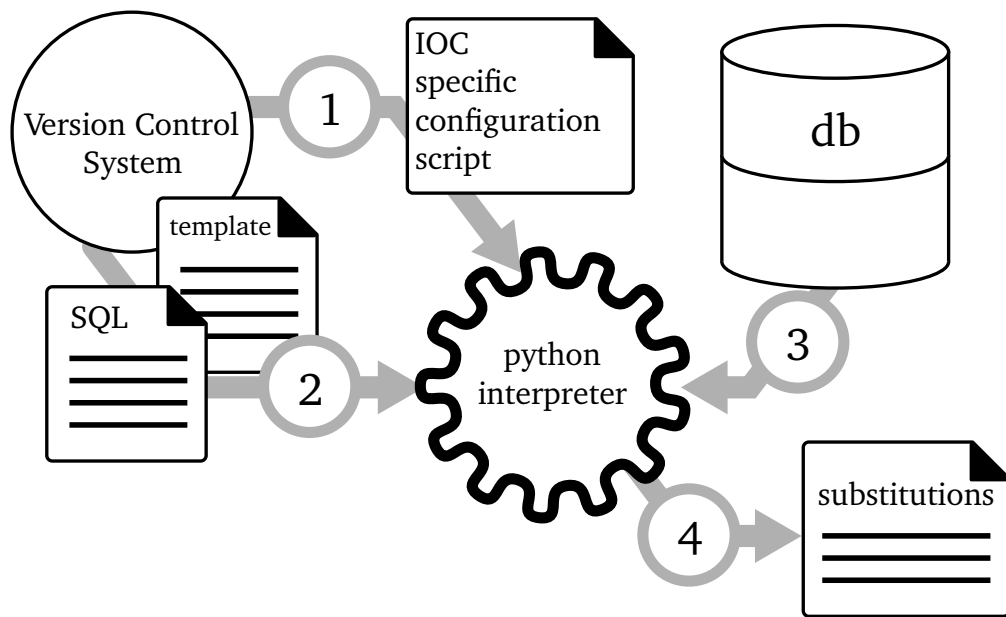


Abb. 8.2.: Funktionsweise des Konfigurationsmechanismus. Für einen bestimmten IOC wird ein spezifisches Skript erstellt ①. Es ist gemeinsam mit den *template*-Dateien und den SQL-Abfragen im Quelltext-Versionsverwaltungssystem gespeichert ②. Die SQL-Abfragen werden dynamisch geladen und ausgeführt ③, sind also nicht fest im Python-Quelltext eingebaut. Abschließend erzeugt das Programm eine korrekt formatierte Textdatei mit den ermittelten Ersetzungen ④.

wurden die in [54] erstellten Datenbanktabellen zur Speicherung der Verkabelung der zur Strahldiagnose verwendeten Leuchtschirme überarbeitet und entsprechende SQL-Abfragen geschrieben. Die Konfigurationsdateien für den betreffenden IOC können nun ebenfalls durch die beschriebene Bibliothek erzeugt werden.

8.2. Speicherung des Zustandes der Strahloptik

Der S-DALINAC bietet eine hohe Flexibilität in der Einstellung der Strahloptik. Die Möglichkeiten, unterschiedliche Messplätze mit Elektronenstrahlen zu bedienen, multiplizieren sich mit den unterschiedlichen Varianten der Rezirkulation des Strahls am Hauptbeschleuniger (Single-Pass, rezirkuliert, isochron/nicht-isochron), sowie nahezu beliebig abstufbarer kinetischer Energie. Da Einstellungen gelegentlich wiederholt werden oder als Grundlage für eine sehr ähnliche Einstellung dienen sollen, brauchen Operateure eine einfache Möglichkeit, den

Zustand der Strahloptik zu speichern und später gegebenenfalls wiederherzustellen.

8.2.1. Nachteile der bisherigen Realisierung

Der Zustand der Strahloptik, das heißt vorwiegend die für die einzelnen Magnete eingestellten Ströme und die Sollwerte für Amplitude und Phase der Hochfrequenzstrukturen, wurden zu Beginn der Migration mit dem *Back Up and Restore Tool* BURT [92] und dem Program SKI [34] gespeichert und wiederhergestellt. Nur die von EPICS-IOCs verwalteten Prozessvariablen konnten mit BURT abgespeichert und wiederhergestellt werden. Dies waren zu dieser Zeit die Parameter der digitalen Hochfrequenzregelung und die Ströme der über serielle Schnittstellen angesteuerten Magnetnetzteile. Alle weiteren Geräte wurden noch über den in [59] entwickelten Kontrollserver gesteuert und eine Speicherung geschah über das Programm SKI auf einen PC im Kontrollraum. Es lag in der Verantwortung des zuständigen Operators sorgfältig zu dokumentieren, wann eine Speicherung stattfand und welche Speicherpunkte der beiden Kontrollsystemdomänen jeweils zusammengehörten. Versäumnisse führten zu „halben“ Speicherpunkten oder zu „halb“ wiederhergestellten Maschinenzuständen. Beide Lösungen speicherten die Daten auf lokalen Kontrollraumcomputern. Operateure waren mitunter gezwungen zunächst herauszufinden auf welchem der Computer ein bestimmter Speicherpunkt abgelegt war. Aufgrund dieser Nachteile wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Neuentwicklung vorgenommen.

8.2.2. Anforderungen an eine Neuentwicklung

Die Anforderungen an eine neue Lösung zu Speicherung der Einstellung der Strahloptik lauten in absteigender Wichtigkeit:

- (1) Konzentration der Funktionalität in eine einzelne Oberfläche,
- (2) Zentralisierte Ablage der Daten, unabhängig vom zur Erzeugung verwendeten Computer,
- (3) Möglichkeit, Metadaten im Verbund mit den Daten abzulegen, etwa den momentan verwendeten Modus („*non-isochronous, single-recirculated, 61 MeV*“),
- (4) Einfache Anzeige der Differenz zwischen der momentanen Einstellung der Strahloptik und einer in der Vergangenheit abgespeicherten Einstellung,
- (5) Hierarchische Gruppierung der einzelnen Prozessvariablen,

- (6) Unterstützung von Größen, welche zwar gespeichert werden, aber bei einer Wiederherstellung standardmäßig die momentanen Werte nicht überschreiben sollen.

Die Wichtigkeit von (4) kann daran verdeutlicht werden, dass eine zunächst getroffene Einstellung häufig im Verlaufe einer Strahlzeit optimiert werden muss. Da die Strahloptik von mehreren Personen eingestellt und über Tage und Wochen gelegentlich nachoptimiert wird, ist die allmähliche Entwicklung einer Einstellung ohne technische Unterstützung schwierig zu überschauen.

Eine hierarchische Ordnung der Prozessvariablen erlaubt es dem Operateur, auf einfache Art und Weise nur Teile eines Speicherpunktes wiederherzustellen, etwa die zu einem einzelnen Subsystem zugehörigen Prozessvariablen.

Punkt (6) ist nützlich für Parameter, die vom individuellen Exemplar eines Geräts abhängen (z. B. zur Kalibrierung). Da Geräte bei Wiederherstellung eines in der Vergangenheit erstellten Speicherpunktes nicht unbedingt an gleicher Stelle zum Einsatz kommen müssen, ist eine Verwendung der alten Kalibrierungsparameter möglicherweise kontraproduktiv.

Weitere Anforderungen wurden in Anbetracht des Kosten-Nutzen-Verhältnisses zunächst verworfen. Hierzu zählen:

- (7) Trennung in reine Server-Komponente und reine GUI-Komponente,
- (8) Ergänzung um Web-basierte Oberfläche.

Punkt (7) dient zur Reduzierung der Anzahl der Netzwerkverbindungen zwischen den IOCs und den Rechnern, die die Speicherung vornehmen. In einer Client-Server-Architektur würde der zentrale Server die Speicherung vornehmen. Daher bräuchte auch nur er Verbindungen zu den IOCs aufrechterhalten. Die Steuerung würde durch einen oder mehrere Clients erfolgen. Diese würden nur einfache Steuerkommandos, etwa zum Auslösen eines Speichervorgangs, oder dessen Wiederherstellung, mit dem Server austauschen. Dieser Gewinn an Effizienz ist am S-DALINAC zweitrangig, da die Anzahl der zu speichernden PVs relativ gering ist (derzeit ca. 1400) und typischerweise nur zwei Computer zur Speicherung eingesetzt werden. In größeren Kontrollsystemen, mit einer deutlich größeren Anzahl von zu speichernden Variablen, würde durch eine Vielzahl von Instanzen der Anwendung mitunter nicht unerhebliche Ressourcen in Anspruch genommen werden. Eine Trennung in Server-Komponente und Client-Anwendung hätte auch eine einfache Realisierung von (8) erlaubt. Die Umsetzung dessen wurde aus wirtschaftlichen Gründen verworfen.

8.2.3. Die neue Anwendung zum Speichern des Maschinenzustandes

Im Rahmen dieser Arbeit erfolge die Umsetzung und Installation einer neuen Lösung zum Speichern und Wiederherstellen des Maschinenzustandes. Sie heißt *ESCoRe* (EPICS Save, Compare, Restore). Die Datenablage ist in Tabellen der zentralen relationalen Datenbank realisiert. Dort werden die Prozesswerte selbst und in einer weiteren Tabelle die zu einem Speicherpunkt zugehörigen Metadaten abgelegt. Auch die Liste der zu sichernden Prozessvariablen wird in einer eigenen Tabelle verwaltet. Zusätzlich ist eine hierarchische Ordnung der Prozessvariablen möglich. Somit sind Konfiguration und gespeicherte Prozesswerte zentral abgelegt und die Benutzeranwendung kann auf beliebigen, auch mehreren Computern ausgeführt werden (vgl. Abbildung 8.3).

Für den Einsatz im Kontrollraum wurde eine graphische Oberfläche entwickelt. Diese erlaubt die Auswahl von zuvor erstellten Speicherpunkten aus einer Liste. Zum schnellen Auffinden eines bestimmten Eintrags kann die Liste nach Metadateneinträgen sortiert und gefiltert werden. Die gespeicherten Prozesswerte selbst werden in einer Baumansicht präsentiert und können anschließend – gegebenenfalls selektiv – wiederhergestellt werden. Welche der Einträge sich vom momentanen Zustand unterscheiden, kann der Benutzer aufgrund farblicher Markierungen schnell erkennen (vgl. Abbildung 8.4).

8.2.4. Kritik und Ausblick

Die zur Speicherung und Wiederherstellung entwickelte Anwendung erfüllt die oben aufgelisteten Anforderungen. Insbesondere können Operateure nun alle Prozesswerte mit einer einzelnen Lösung speichern. Als nützlich hat sich im

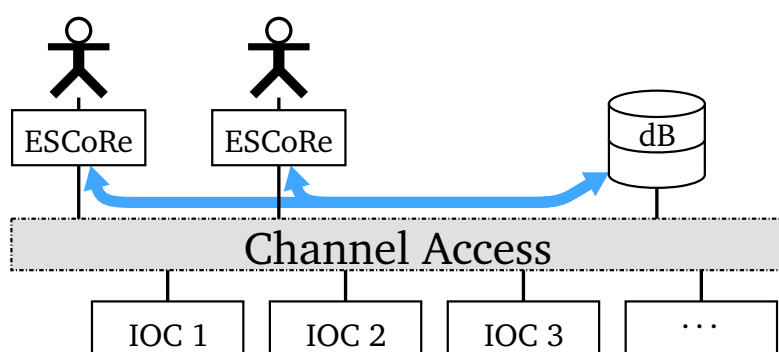


Abb. 8.3.: Schema der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Anwendung zur Speicherung der Beschleunigereinstellung.

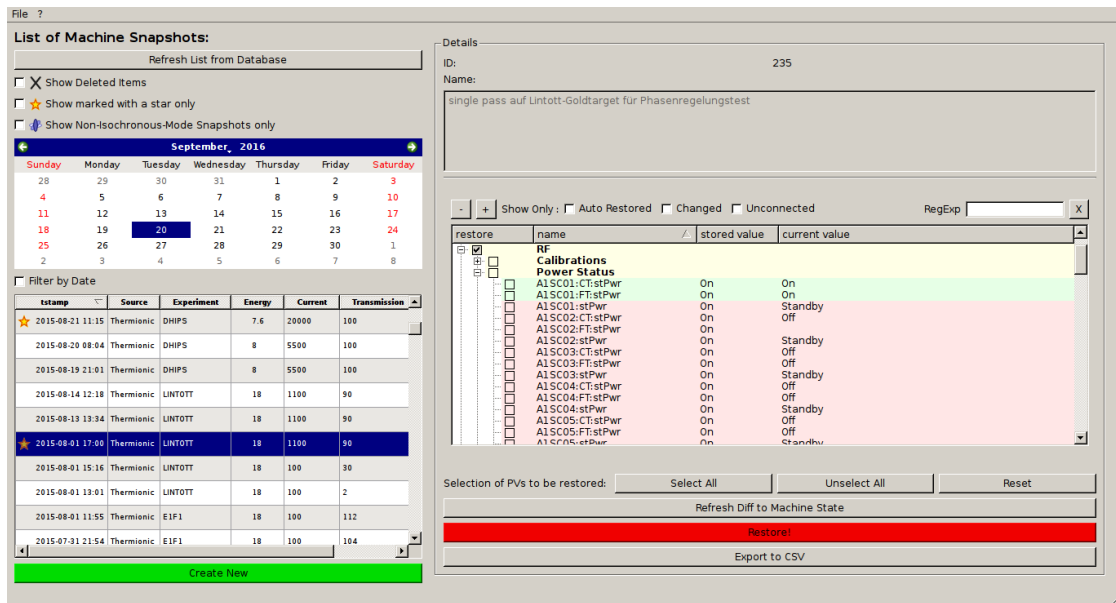


Abb. 8.4.: Bildschirmfoto der Anwendung zur Speicherung und Wiederherstellung des Zustandes der Einstellung des Beschleunigers. Auch ein Vergleich des momentanen Zustandes mit einem früheren Zustand ist möglich.

Besonderen die Möglichkeit erwiesen, den Unterschied zwischen momentanen Prozesswerten und gespeicherten Prozesswerten schnell zu ermitteln.

Inzwischen ist auch das Open-Source-Projekt MASAR [93] in einem für den Produktivbetrieb einsetzbaren Zustand. Es wird an der Synchrotronlichtquelle NSLS-II am *Brookhaven National Laboratory* eingesetzt. In Anbetracht dieser fortgeschrittenen Entwicklung sollte gegebenenfalls eine neuerliche Evaluation dieser Option durchgeführt werden (die Entwicklung des hier vorgestellten Programms begann vor der Veröffentlichung von MASAR). Vorteil wäre, dass die Pflege der eigenen Lösung *ESCoRe* entfallen könnte.

8.3. Web-basierte Oberflächen

Die im Kontrollraum eingesetzten Benutzeroberflächen sind entweder Oberflächen im Stile klassischer graphischer Anwendungen, oder Bedieneinheiten aus berührungsempfindlichem Bildschirm und physischen Drehknöpfen. Die einfachen graphischen Bedienfenster werden mit dem Open-Source-Projekt *Control System Studio* (CS-Studio) erstellt [94]. Eine eigens entwickelte Anwendung

dient dagegen der Darstellung von Oberflächen auf den berührungsempfindlichen Bildschirmen und zur Auswertung der Signale der Drehknöpfe [63].

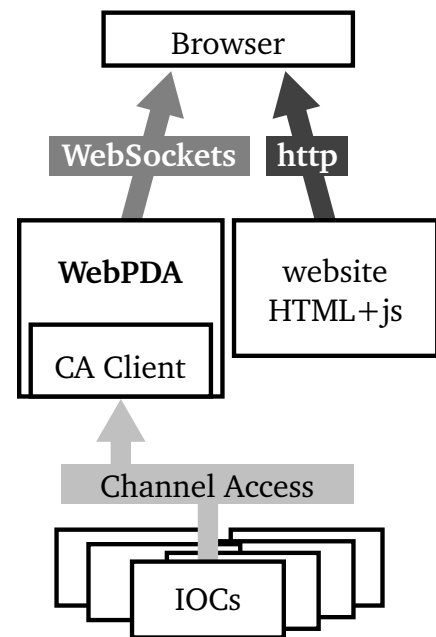
Eine weitere Kategorie von Oberflächen sind solche, die sich in einem Webbrowser anzeigen lassen. Mit ihnen gelingt die Anzeige von Prozesswerten am flexibelsten, da heutzutage auf praktisch jedem Benutzerendgerät ein solcher vorhanden ist. Auf diesem Wege lassen sich mit geringem Konfigurationsaufwand Oberflächen auf Mobilgeräten und stationären Anzeigen (z. B. Statusdisplays) realisieren. Am S-DALINAC ist seit einigen Jahren die Anzeige von Zeitreihen der Prozesswerte des Verflüssigers im Webbrowser möglich [60]. Diese sind aber nur für archivierte Größen nutzbar, aber nicht für solche, die gar nicht archiviert werden sollen. Echtzeitanzeigen sind damit also nicht möglich. Schwerwiegender ist die Einschränkung dieser Oberfläche auf die veraltete Kontrollsystemdomäne welche nur die Kälteerzeugung umfasst.

Um sämtliche über das *Channel-Access*-Protokoll verfügbaren Prozessgrößen in Web-basierten Oberflächen darstellen zu können, sollte eine neue Lösung installiert werden. Eine Entwicklung an der *Spallation Neutron Source* (SNS) erlaubt die Wiederverwendung von den mit CS-Studio erstellten Oberflächen [95]. Als Nachteil müssen hoher Speicher- und Rechenzeitbedarf genannt werden. Effizienter ist in dieser Hinsicht das Projekt *WebCA* [96]. Es erfordert jedoch die Installation eines Web-Browser-Plugins auf jedem Endgerät. Weiterhin ist die Kompatibilität nicht mit allen Web-Browsern gegeben. Allein auf Server-seitigen Technologien beruhende Lösungen, welche ein aktives periodisches Neu-Anfordern der Inhalte seitens des Webbrowsers erfordern, wurden aufgrund der geringen Effizienz und niedrigen möglichen Aktualisierungsrate verworfen.

Die hier umgesetzte Lösung nutzt sogenannte WebSockets. Bei dieser Technologie wird die zur klassischen HTTP-Übertragung der initialen Webseite vom Client zum Server aufgebaute TCP-Verbindung nach der Datenübertragung nicht geschlossen. Der Server kann dem Client somit unaufgefordert Daten senden. Andernfalls müsste jeder Datenaustausch durch den Client eingeleitet werden. Da diesem aber eben die Information fehlt, *wann* der Server neue Daten liefern kann, muss er auf Verdacht Anfragen schicken. WebSockets erlauben dagegen eine effiziente, durch den Server initiierte Datenübertragung, genau dann, wenn es erforderlich ist, zum Beispiel wenn sich der Wert einer Prozessgröße geändert hat. Auch ist die Übertragung auf diesem Wege effizienter, da der HTTP-Header für die Übertragung von Aktualisierungen einzelner Werte entfallen kann. Das Projekt *WebPDA* [97] nutzt diese Technik. Die Funktionsweise ist in Abbildung 8.5 skizziert.

Dieser Ansatz erlaubt nicht die Wiederverwendung von den mit CS-Studio erstell-

Abb. 8.5.: Funktionsweise der Web-Oberflächen. Der Webbrowser lädt zunächst eine Webseite von einem klassischen HTTP-Server. Teil dieser Webseite ist die WebPDA-JavaScript-Client-Bibliothek. Über sie wird eine Verbindung zur Webanwendung *WebPDA* aufgebaut und die Namen der interessierenden Prozessvariablen übertragen. Über einen integrierten CA-Client werden die Prozesswerte von den entsprechenden IOCs angefordert. Dabei wird von der *MONITOR*-Funktionalität des *Channel-Access*-Protokolls Gebrauch gemacht (vgl. Kap. 5.1.2). Diese ereignisgesteuerten Übertragungen werden von der WebPDA-Webanwendung via WebSockets an den Webbrowser weitergeleitet und dort mittels JavaScript und HTML zur Anzeige gebracht.



ten Oberflächen. Das ist kein schwerwiegender Nachteil, da Oberflächen, die in Webbrowsern verwendet werden sollen, meist ohnehin eine eigene Gestaltung erhalten. Grund hierfür ist, dass im Kontrollraum nicht nur die Überwachung stattfindet, sondern auch häufig Einstellungen verändert werden. Auf Webbrowsern verwendete Oberflächen werden selten zur Einflussnahme genutzt, sondern überwiegend zur Überwachung. In vielen Fällen würden somit ohnehin neue Oberflächen entworfen werden. Als größerer Nachteil erweist sich die Notwendigkeit, bei Erstellung dieser Oberflächen die Programmierung auf HTML- und JavaScript-Ebene nicht vollständig vermeiden zu können. Abbildung 8.6 zeigt als Beispiel eine Oberfläche zur Überwachung der Vakuumdrücke im Bereich des Beschleunigers.

8.4. Einrichtung von *Channel-Access*-Gateways

Das *Channel-Access*-Protokoll ermöglicht einen einfachen Zugriff auf Prozessvariablen, wenn sich Client und Server im gleichen Netzwerk befinden. Da am Beschleuniger mehrere durch eine Firewall getrennte Netzwerke eingesetzt werden [16], ist der Datenaustausch zunächst nicht immer möglich. Diese Einschränkung lässt sich durch den Einsatz von *Channel-Access*-Gateways (CA-Gateway) gezielt aufheben.

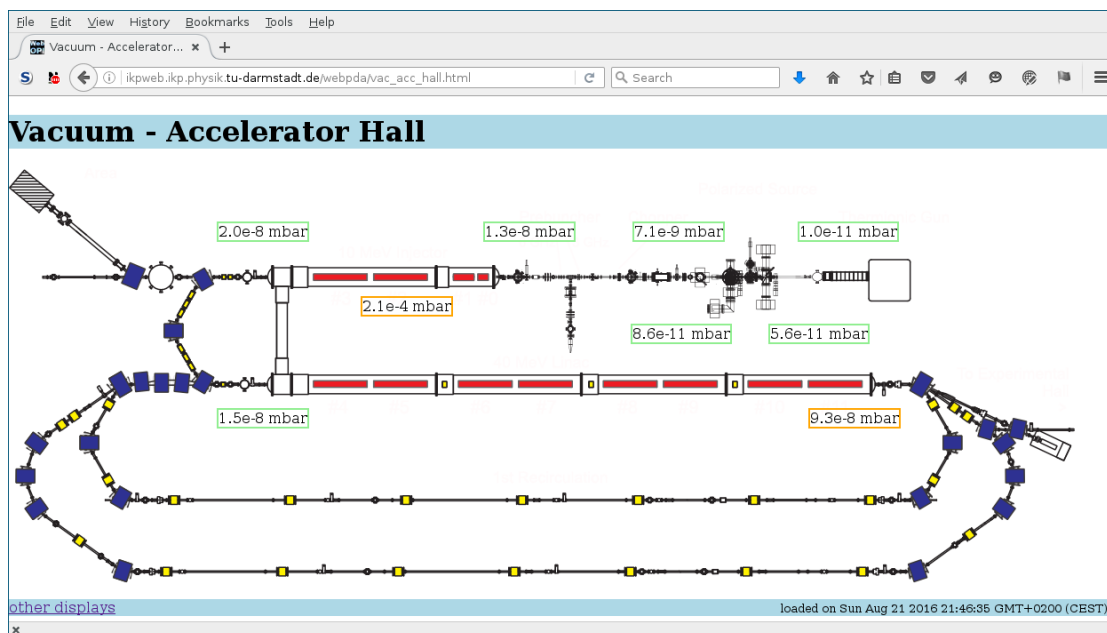


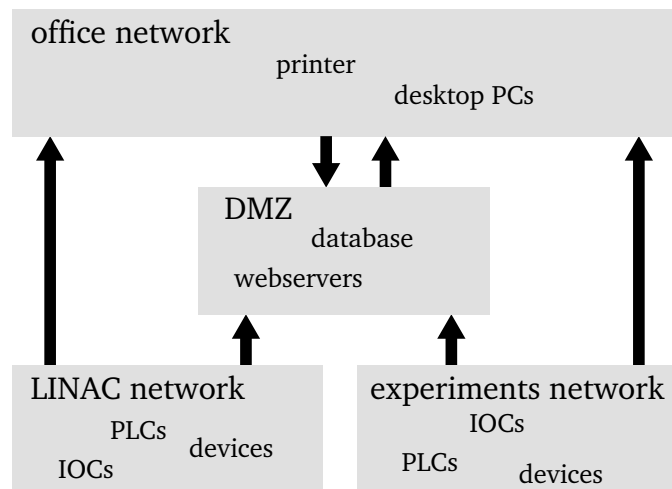
Abb. 8.6.: Beispiel für eine Webbrowser-basierte Oberfläche. Diese zeigt den Zustand des Vakuumsystems im Bereich des Beschleunigers selbst. Die Implementierung ist unabhängig vom Webbrowser. Lediglich die Unterstützung von WebSockets muss gegeben sein, was bei allen Webbrowsern mit nennenswerter Verbreitung als gegeben angenommen werden kann.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst die am Institut für Kernphysik vorliegende Netzwerkstruktur skizziert. Anschließend werden die relevanten technischen Aspekte des *Channel-Access*-Protokolls und die prinzipielle Wirkungsweise des CA-Gateways erläutert. Abschnitt 8.4.3 stellt die Konfiguration der eingesetzten CA-Gateways vor. Diese wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit gegenüber der in [16] beschriebenen Installation erweitert.

8.4.1. Netzwerkstruktur des Instituts für Kernphysik

Eine vereinfachte Darstellung der Netzwerkstruktur am Institut für Kernphysik zeigt Abbildung 8.7, sie ist zum Teil Ergebnis von [16]. Zur Steuerung des Beschleunigers verwendete Netzwerkgeräte und Computer sind über ein dediziertes Netzwerk miteinander verbunden. Unerwünschte Zugriffe von außen werden durch eine Firewall unterbunden. Eine vollständige Trennung von anderen Netzwerken ist jedoch als unpraktikabel anzusehen, da etwa die Verteilung von Software über das Netzwerk durchgeführt wird. Daher ist es über einen Rou-

Abb. 8.7.: Vereinfachte Darstellung der Struktur des Netzwerks am Institut für Kernphysik. Die Aufteilung in einzelne Netzwerke dient der Sicherheit. Innerhalb der Netzwerke sind Zugriffe zwischen allen Teilnehmern uneingeschränkt möglich. Ein Router erlaubt den Aufbau gewisser Verbindungen zwischen den einzelnen Netzwerken auf Grundlage eines Regelwerks.



ter mit den anderen Netzwerken des Instituts für Kernphysik und dem Internet verbunden. Eine Firewall verhindert dabei, dass Verbindungen von außen zu Geräten innerhalb des Netzwerks des Beschleunigers aufgebaut werden können. Datenaustausch mit in anderen Netzwerken lokalisierten Computern muss daher immer von einem Computer, welcher sich im Beschleunigernetzwerk befindet, initiiert werden. Nachdem dies geschehen ist, ist der Datenaustausch für die Dauer der Verbindung bidirektional möglich. Eine Filterung der dabei ausgetauschten Datenpakete findet nicht statt. Somit ist es von hoher Wichtigkeit, dass Computer im Netzwerk des Beschleunigers ausschließlich zu vertrauenswürdigen Computern Verbindungen aufbauen.

Manche Computer haben keinen unmittelbaren Einfluss auf den Beschleunigerbetrieb und sollen von unsicheren Netzwerken zugreifbar sein. Sie sind in einer sogenannten *Demilitarized Zone* (DMZ) lokalisiert. Dabei handelt es sich um ein eigenes Netzwerk, zu welchem der Router jedoch Verbindungsaufbau aus den anderen Netzwerken zulässt. Daten werden aus dem Beschleunigernetzwerk aktiv auf diese Computer übertragen. Ein Benutzer, der ein Endgerät in einem anderen Netzwerk verwendet, kann eine Verbindung dorthin aufbauen und die Daten abrufen. Dieser Mechanismus funktioniert für Daten, die ohnehin zwischengespeichert werden (z. B. in einem Archiv). Der Austausch von Echtzeitdaten muss hingegen auf anderem Wege erfolgen.

8.4.2. Funktionsprinzip eines *Channel-Access-Gateways*

In Abschnitt 5.1.2 war das Funktionsprinzip des *Channel-Access-Protokolls* bereits erläutert worden. Der dort beschriebene Mechanismus zur konfigurationsfrei-

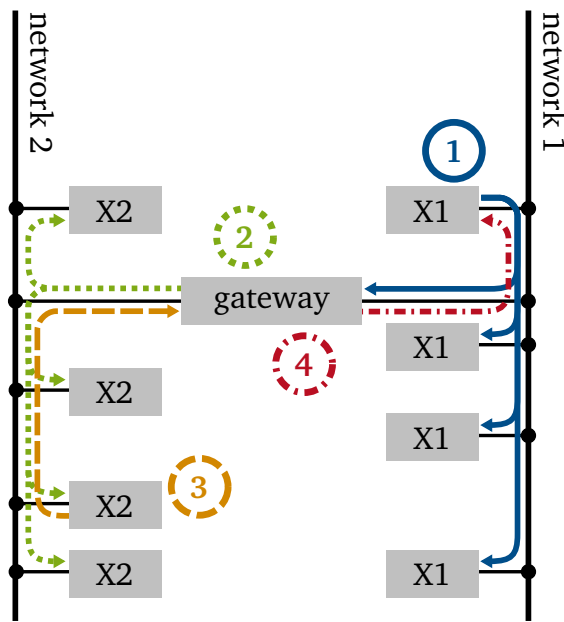


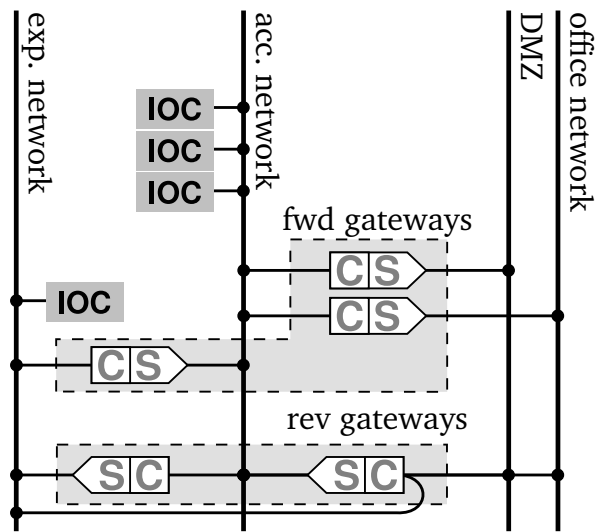
Abb. 8.8.: UDP-Broadcasts erreichen alle Teilnehmer (X1) einer Broadcast-Domäne (hier unterschieden als *network 1* und *network 2*). Gehört ein sog. Gateway-Rechner beiden Domänen an, kann er Broadcasts mit Ursprung in einem Netzwerk (1) stellvertretend im anderen Netzwerk ausführen (2). Antworten (3) müssen ebenfalls weitergeleitet werden (4). Der beschriebene Ablauf entspricht der Auflösung eines Prozessvariablenbezeichners. Ein Transport des vollständigen CA-Protokoll erfordert weitere Funktionalität auf dem Gateway-Computer.

en Auflösung von Prozessvariablenbezeichnern nutzt UDP-Broadcasts. Dessen Reichweite wird in einem Netzwerk nicht durch Switches/Hubs begrenzt, jedoch durch Router. Als eine Broadcast-Domäne bezeichnet man den Teil eines Netzwerks, der von einem bestimmten Knoten aus per Broadcast angesprochen werden kann. Abbildung 8.8 zeigt, wie ein sogenannter Gateway-Computer Teil zweier Broadcast-Domänen ist und die Namensauflösung dennoch ermöglicht.

Der Auflösung des PV-Bezeichners folgt meist der Aufbau einer TCP-Verbindung (vgl. 5.1.2). Ist eine Firewall installiert, so ist der Aufbau dieser Verbindung über Netzwerkgrenzen hinweg nicht möglich. Dies lässt sich umgehen, indem auch die TCP-Verbindung stellvertretend durch den Gateway-Computer aufgebaut wird. Für den eigentlichen CA-Client erscheint der Gateway-Computer als regulärer CA-Server. Dass die Anfragen und der Verbindungsaufbau tatsächlich stellvertretend zu einem dritten Computer getätigt werden, bleibt dem *Client* verborgen.

Eine vollständige Implementierung eines solchen CA-Gateways liegt als Open-Source-Software vor [98, 99, 100]. Es kann die Zugriffe auf Prozessvariablen auch in eingeschränktem Maße ermöglichen. So können etwa lesende Zugriffe gestattet und schreibende Zugriffe verboten werden. Somit kann eine Überwachung des Beschleunigers und des Heliumverflüssigers über die Computer in den Büros der Mitarbeiter erfolgen.

Abb. 8.9.: Konfiguration der CA-Gateways. Sie erlauben regulierten Zugriff auf Prozessvariablen über Netzwerkgrenzen hinweg. Die Netzwerke *experimental network* und *accelerator network* sind für den Experimentierbetrieb von unmittelbarer Wichtigkeit. Die einzelnen CA-Gateway-Instanzen treten jeweils in einem Netzwerk als CA-Server (S) auf und in einem oder mehreren Netzwerken als CA-Client (C).



8.4.3. Konfiguration des Channel-Access-Gateways am S-DALINAC

Abbildung 8.9 zeigt die gegenüber [16] erweiterte Konfiguration des CA-Gateways, die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen wurde. IOCs sind im Netzwerk des Beschleunigers und im Netzwerk der Experimente lokalisiert. Bereits für den normalen Experimentierbetrieb ist es erwünscht, dass die Prozessvariablen aller IOCs über Netzwerkgrenzen hinweg ausgetauscht werden können. Als Beispiel sei der im Netzwerk der Experimente bereitgestellte Strahlstrommesswert an den Spektrometern genannt. Er muss den Operateuren während der Optimierung der Strahloptik zur Verfügung stehen. Hierfür wären zwei CA-Gateway-Instanzen bereits ausreichend gewesen.

Als erweiterte Anforderung wird der lesende Zugriff auf sämtliche Prozessvariablen aus dem DMZ-Netzwerk und allen weiteren Netzwerken (d. h. insbesondere dem Bürocomputernetzwerk) gefordert. Darüber hinaus bieten CA-Gateways einen Satz von Prozessvariablen zur Diagnose ihres eigenen Zustandes an. Auch diese sollen in den jeweils anderen Netzwerken verfügbar sein. Letzteres wird über eine hier als *reverse CA-Gateway* bezeichnete Instanz ermöglicht. Diese tritt in all jenen Netzwerken, in welchen ein anderes CA-Gateway als CA-Server auftritt, als Client auf und macht die entsprechenden Statusprozessvariablen im Netzwerk des Beschleunigers sichtbar.

Die nach Abschluss dieser Arbeit eingesetzte CA-Gateway-Konfiguration ist in Abbildung 8.9 vereinfacht wiedergegeben. Sie ist in Anhang D ausführlich beschrieben. Insbesondere sind Maßnahmen zur Vermeidung von Schleifen dort dokumentiert.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei übergeordnete Themengebiete bearbeitet. Der erste Bereich umfasst die Verbesserung und Erweiterung der Hochfrequenzsysteme (Teil I). Bei dem zweiten Bereich handelt es sich um das Beschleunigerkontrollsystem (Teil II).

Die in früheren Arbeiten als einsetzbar befundenen piezoelektrischen Aktuatoren konnten im Rahmen dieser Arbeit als Antriebe der Frequenzsteller in den Regelbetrieb überführt werden. Seit Mitte 2014 wurden Strahlzeiten mit diesen Elementen durchgeführt. Sie kamen dabei an den beiden Beschleunigungsstrukturen des neuen Injektormoduls und an den ersten beiden Beschleunigungsstrukturen des Hauptbeschleunigers zum Einsatz. Die erzielte Genauigkeit in Phase und Amplitude der beschleunigenden elektromagnetischen Felder hängt, der bisherigen Erfahrung zufolge, nicht vom Typ des eingesetzten Aktuators ab. Die langfristige Strategie sieht vor, die Frequenzsteller aller Kryostatmodule umzurüsten. Dies soll für einzelne Module dann erfolgen, wenn auch aus anderen Gründen eine Wartung erforderlich ist. Das im Rahmen dieser Dissertation eigens für den Betrieb von piezoelektrischen Aktuatoren entwickelte Netzteil ist mit den Netzteilen der bislang eingesetzten magnetostriktiven Aktuatoren an der gleichen Busplatte austauschbar einsetzbar. Somit ist die allmähliche Umstellung auf Seiten der Elektronik und des Kontrollsystems keinen Einschränkungen unterworfen. Die Umstellung auf piezoelektrische Elemente verhindert die Entstehung starker Magnetfelder in der Nähe der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen. Somit wird ein möglicher Beitrag zur Erhöhung des Oberflächenrestwiderstandes sicher unterbunden.

Eine Demonstration der Flexibilität der für den S-DALINAC entwickelten digitalen Hochfrequenzregelung geschah an einem supraleitenden Viertelwellenresonator des supraleitenden Ionenbeschleunigers ALPI am *Laboratori Nazionali di Legnaro* (INFN LNL). Es wurden Regelabweichungen von $\Delta\varphi_{\text{rms}} < 0,1^\circ$ und $(\Delta M/M)_{\text{rms}} < 2 \cdot 10^{-4}$ über mehr als 30 Minuten eingehalten. Dies gelang, obwohl der automatische Betrieb des Frequenzstellers des Viertelwellenresonators aufgrund technischer Inkompatibilität nicht möglich war. Ionen wurden nicht beschleunigt, da die Tests während einer Wartungsphase des ALPI-Beschleunigers durchgeführt wurden.

Zur Auswertung von Phasenmonitorsignalen wurden Komponenten der digitalen Hochfrequenzregelung dupliziert und in einem eigenen klimatisierten Elektronik-

schränk aufgebaut. Die Verteilung des Referenzsignals, welches zur Phasenmessung erforderlich ist, wurde entsprechend erweitert. Für die Integration in das Beschleunigerkontrollsystem musste die Software zur Verarbeitung der über USB bereitgestellten Datenströme angepasst werden. Diese Erweiterungen bereiten das System auf die standardmäßige Auswertung der am S-DALINAC verbauten Phasenmonitore vor. Neben dem Aufbau einer kontinuierlichen Strahlstromüberwachung sind damit zukünftig auch Phasenmessungen zur Überprüfung der Einstellung der Strahloptik möglich.

Die Migration des Beschleunigerkontrollsystems auf ein EPICS-basiertes Kontrollsystem wurde abgeschlossen. Ein Teil der Anstrengungen, etwa die Migration der Ansteuerung der Strahldiagnose anhand optischer Leuchtschirme wird noch im Kontext von [63] bearbeitet. Hervorzuheben ist die in dieser Arbeit erreichte, gegenüber den alten Systemen deutlich erweiterte Instrumentierung des Heliumverflüssigers sowie des Alarmsystems. Dies erlaubt eine umfassendere Diagnose von Störungen. Eine besondere Herausforderung waren die im Rahmen des Aufbaus einer Weglängenverstellung zu programmierenden Motorsteuerungen und deren Einbindung in das Beschleunigerkontrollsystem.

Weiterhin wurde die geräteunabhängige Funktionalität erweitert. Ein Mechanismus zur automatisierten Konfiguration von IOCs kommt inzwischen für alle CAN-Bus-gesteuerten Netzteile zum Einsatz. Auch die Speicherung der momentanen Einstellung der Strahloptik sowie aller weiteren relevanten Parameter wurde vereinheitlicht. Für die Zukunft ist dennoch die Evaluierung eines extern entwickelten Programms (MASAR) empfehlenswert. Die Möglichkeit Prozessdaten über beliebige Webbrowser anzeigen zu können, wurde mit der Open-Source-Software *WebPDA* installiert. Insbesondere bei der Inbetriebnahme der Magnetnetzteile der neu aufgebauten dritten Rezirkulation war die Verwendung solcher Oberflächen auf Mobilgeräten eine außerordentlich nützliche Hilfe.

Die genannten Veränderungen am Beschleunigerkontrollsystem machen alle Prozessgrößen in einer einheitlichen Art und Weise zugänglich. Operateure können die für ihre Aufgaben erforderlichen Informationen nun effizienter aufnehmen, da die Anzeigen für verschiedene Prozessgrößen beliebig in graphischen Oberflächen kombiniert werden können. Kontrollsystementwickler profitieren von den internen Vereinheitlichungen. Neue Geräte werden nun immer nach dem gleichen Schema in das Kontrollsystem eingebunden. Eine Rücksichtnahme auf einzelne Insellösungen für bestimmte Subsysteme ist nicht mehr erforderlich.

Die Entwicklung von Kontrollsystemen sollte zu keinem Zeitpunkt als abgeschlossen betrachtet werden. Bereits die Tatsache, dass die verwendeten Computernetzwerke weiterentwickelt werden, macht eine laufende Anpassung des

Kontrollsystems notwendig. Die strategische Entwicklung sollte eine Reduzierung äußerer Abhängigkeiten zum Ziel haben. Sämtliche Software sollte entweder Teil der verbreiteten Linux-Distributionen sein, oder als Quelltext vorliegen. Die Paketierung und Verteilung sollten dann über IKP-interne Mechanismen erfolgen.

Auch EPICS selbst wird fortlaufend weiterentwickelt. Während am S-DALINAC eine Version aus dem Entwicklungszweig 3.14 im Einsatz ist, wird von den zuständigen Entwicklern der Zweig 3.15 seit geraumer Zeit als stabil angesehen. Nützliche Erweiterungen der Fähigkeiten von IOCs lassen sich möglicherweise auch durch Softwarekomponenten von *EPICS Version 4* erzielen. Die sich hierdurch bietenden Möglichkeiten sollten evaluiert und gegebenenfalls an geeigneten Stellen implementiert werden.

A. Einfluss der Stickstoffbefüllung auf Regelabweichungen von Phase und Amplitude

Die in Kapitel 3 vorgestellte Lösung zur Ansteuerung von piezoelektrisch angetriebenen Abstimmrahmen wurde außerhalb des Strahlbetriebs an der ersten Beschleunigungsstruktur des Hauptbeschleunigers getestet. Abbildung A.1 zeigt einen 100-minütigen Ausschnitt aus der in Abbildung 3.9 (Seite 32) gezeigten Zeitreihe. Bei Einsetzen eines Flüssigstickstoff-Füllvorgangs am Schild des Kryostaten kommt es zu einem vorübergehenden Eingriff der Eigenfrequenzregelung. Drei bis vier Minuten später ist diese Korrektur weitgehend wieder aufgehoben. Es verbleiben jedoch Störungen, welche den erzielten Regelabweichung der Phase weiterhin vergrößern. Grund hierfür dürften durch den unter Druck in die Vorratsgefäße einströmenden, siedenden Stickstoff verursachte Vibrationen sein, deren Frequenzen nicht im Arbeitsbereich der Eigenfrequenzregelung liegen.

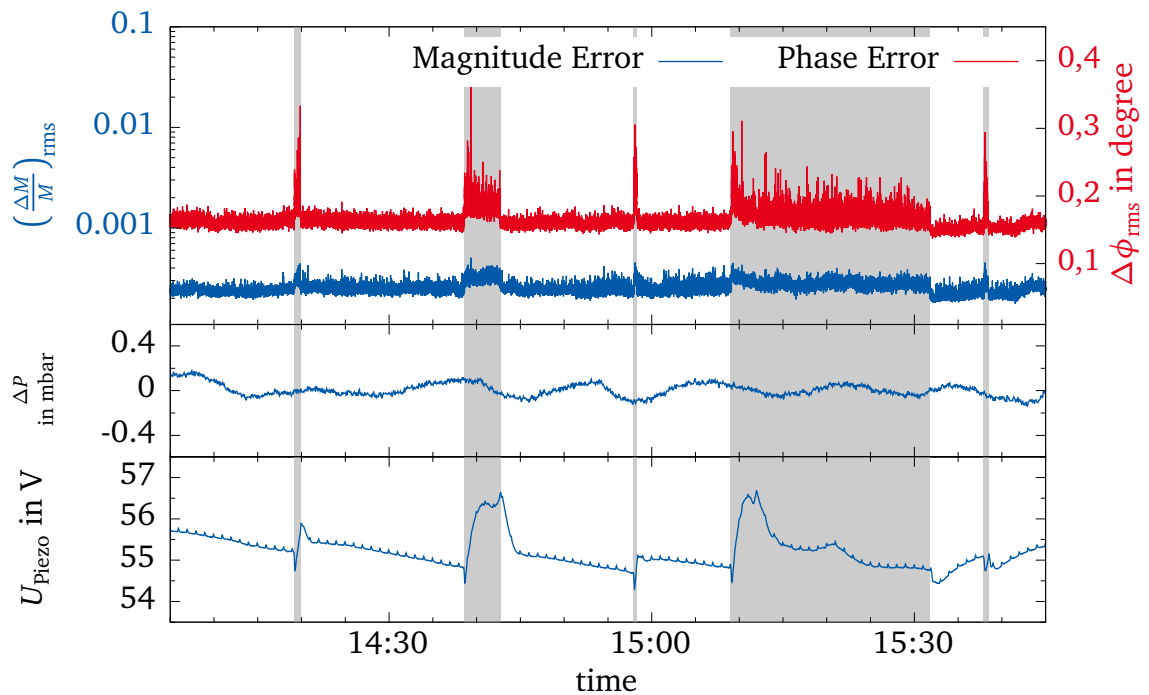


Abb. A.1.: Stabilität einer, mit piezoelektrischen Aktuatoren auf Sollfrequenz gehaltenen, Beschleunigungsstruktur. Grau hinterlegte Bereiche markieren Zeiträume, in welchen die Stickstoffbefüllung aktiv war (Beginn jeweils ca. 14:20, 14:38, 14:58, 15:09 und 15:38).

B. Anpassung des *llbbcusb-Device-Support-Softwaremoduls*

B.1. Hintergrund

Die Kommunikation mit den einzelnen Regelungsplatinen der digitalen Hochfrequenzregelung geschieht über zwei getrennte Kanäle. Über CAN-Bus kann mit einem Mikrocontroller auf der Basisbandplatine mit niedriger Datenrate (1 MS/s, geteilt mit weiteren CAN-Bus-Teilnehmern auf demselben CAN-Bus-Segment) bidirektional kommuniziert werden. Indirekt können auf diesem Wege auch Inhalte in die Speicher des FPGAs geschrieben, bzw. von dort gelesen werden. Über den CAN-Bus lässt sich daher ein Regelkreis vollständig steuern, aber nur eingeschränkt überwachen.

Der zweite Kanal stellt Daten aus den Speichern der im FPGA implementierten ALU direkt über einen FTDI-Chip (FT2232C) auf einer USB-Schnittstelle zur Verfügung. Über diese Schnittstelle sind keine Schreibzugriffe möglich, d. h. sie kann nicht zur Steuerung der Regelkreise eingesetzt werden. Der Vorteil besteht in der Möglichkeit, die Daten mit hoher Rate lesen zu können. Es können vier frei wählbare Signale mit voller zeitlicher Auflösung und Genauigkeit (18 bit bei 930 200 kHz) oder acht Signale mit voller zeitlicher Auflösung und leicht reduzierter Genauigkeit (16 bit bei 930 200 kHz) übertragen werden. Die Echtzeitdaten eignen sich insbesondere für die Inbetriebnahme eines Regelkreises an einer supraleitenden Beschleunigungsstruktur, da hierfür eine Bewertung der Signale bis hin zu einigen kHz erforderlich ist.

Werden die Basisbandplatinen in einem Baugruppenträger mit Busplatine eingesetzt, werden diese Daten gleichzeitig auch über die Busplatine transportiert und über eine gesonderte Schnittstellenplatine gesammelt. Diese stellt sie dann auf einer einzelnen USB-Schnittstelle zur Verfügung. Eine zweite Busplatine mit einer eigenen Schnittstellenplatine lässt sich über eine LVDS-Verbindung zusätzlich anbinden. Es können vier bzw. acht Signale aller auf den Busplatinen aufgesteckten Basisbandplatinen frei gewählt werden. Darüber hinaus stellt die Schnittstellenplatine auf einer zweiten USB-Schnittstelle zeitlich gemittelte Werte aller auf den sechzehn einzelnen Basisbandplatinen digital vorliegenden Signale gleichzeitig zur Verfügung ($1024 \times 32 \text{ bit} \approx 2 \text{ kS/s}$). Diese reduzierten Daten eignen sich insbesondere für die kontinuierliche und gleichzeitige Überwachung aller

Regelkreise. Somit lassen sich sechzehn Regelkreise über zwei USB-Schnittstellen überwachen.

B.2. Bestehende Implementierung

In [16] wurde ein *Device-Support*-Softwaremodul für die Auslese der über die beschriebenen USB-Schnittstellen bereitgestellten Daten implementiert. Es sucht auf dem USB-Bus nach den kompatiblen Geräten und öffnet ggf. die passenden Schnittstellen. Es stellt die zeitlich hoch aufgelösten Daten auf einem fest eingestellten TCP-Port zur Verfügung. Client-Anwendungen können sich über TCP/IP mit diesem Port verbinden und die rohen Daten über das Netzwerk zur weiteren Verarbeitung (z. B. einfache Anzeige) erhalten.

Die zeitlich reduzierten Daten werden ebenfalls auf einem anderen TCP-Port zur Verfügung gestellt. Für die Praxis relevanter ist hier aber die gleichzeitige Übertragung in EPICS-Waveform-Records. Für jedes Signal wird ein Waveform-Record konfiguriert, welcher jeweils 200 aufeinanderfolgende Werte des Signalverlaufs aufnimmt. In einem nachgeschalteten Schritt werden diese Werte gemittelt und somit eine für die Darstellung auf einer graphischen Benutzeroberfläche geeignete Aktualisierungsrate von 10 Hz erreicht.

Die Implementierung des beschriebenen Softwaremoduls war in der Sprache C++ vorgenommen worden und zielte auf hohe Wiederverwendbarkeit und möglichst hohe Unabhängigkeit der einzelnen Software-Komponenten untereinander ab. Die kontinuierliche Datenauslese über die beiden USB-Schnittstellen, die Weiterleitung der Daten an eine beliebige Anzahl von Client-Anwendungen und die Übertragung in die Waveform-Records machen den Einsatz einzelner Threads für jede dieser Aufgaben notwendig. Diese werden zur Initialisierungszeit des IOCs gestartet, bzw. jene für das Bedienen von TCP-Clients jeweils vor Verbindungsaufbau.

Der Einsatzzweck des Softwaremoduls war auf den Anwendungsfall eines einzelnen Baugruppenträgerpaares beschränkt. Der Quelltext war so zu modifizieren, dass die genaue Anzahl auszulesender USB-Schnittstellen in Zukunft ohne weitere Modifikationen auf Quelltextebene verändert werden kann. Abbildung B.1 zeigt schematisch den Aufbau des ursprünglichen Softwaremoduls.

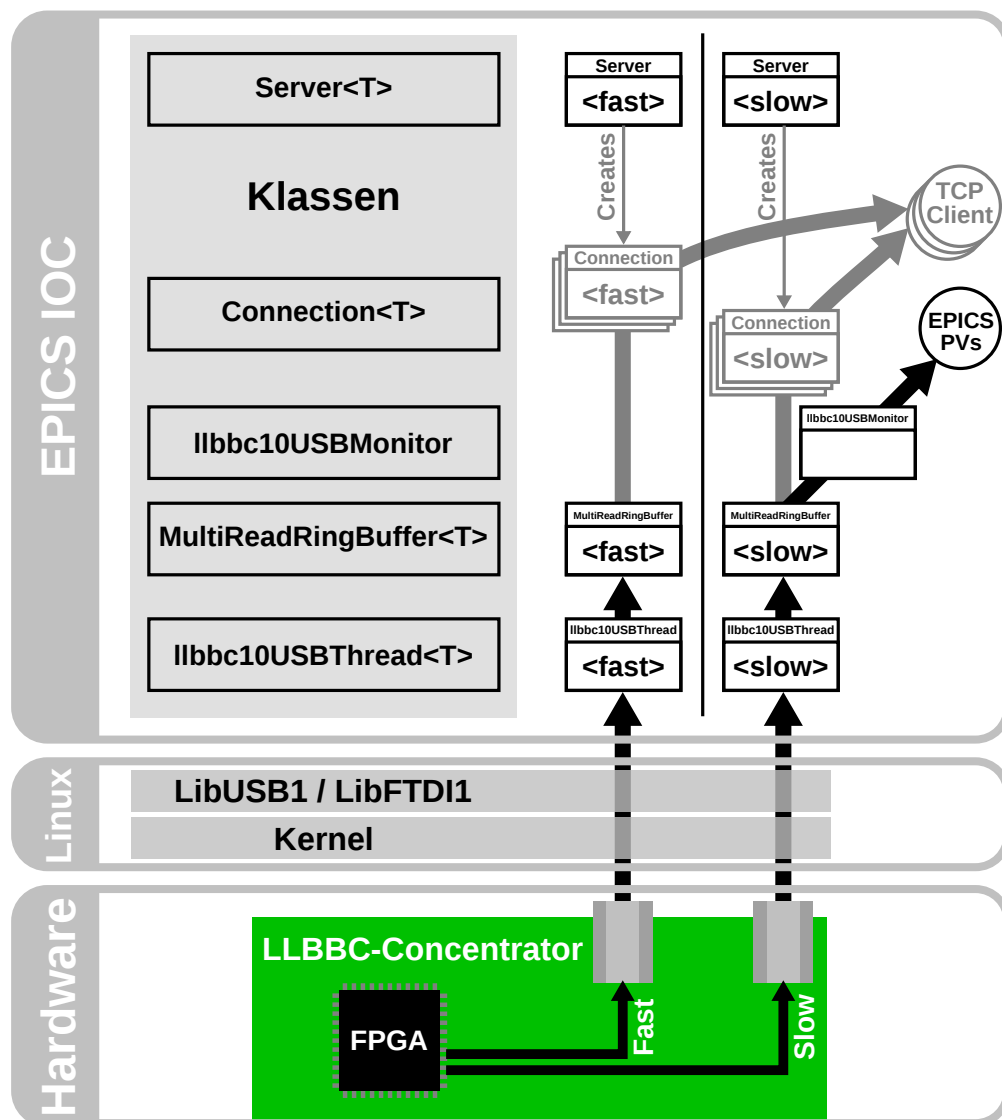


Abb. B.1.: Funktionsweise des ursprünglichen llbbusb-Device-Support-Softwaremoduls. Die Hardware stellt Daten über zwei USB-Schnittstellen bereit. Diese werden auf einem Linux-PC mithilfe der Bibliotheken *libusb1* und *libftdi1* von einem EPICS-IOC verarbeitet. Für die beiden USB-Schnittstellen wird jeweils ein *llbbc10USBThread*-Objekt zum Einlesen der Daten und ein *MultiReadRingBuffer*-Objekt zum Puffern der Daten angelegt. Die Puffer werden kontinuierlich mit den jeweils aktuellsten Daten überschrieben, unabhängig davon, ob andere Threads die Daten weiterverwerten. Die Daten niedriger Datenrate (<slow>) werden von *llbbc10USBMonitor* als EPICS-Prozessvariablen verfügbar gemacht. Für beide Puffer steht außerdem dauerhaft jeweils ein *Server*-Thread bereit. Versucht sich ein TCP-Client zu verbinden, wird automatisch ein *Connection*-Objekt erzeugt, welches die Daten aus dem jeweiligen Puffer liest und über die TCP-Verbindung verschickt.

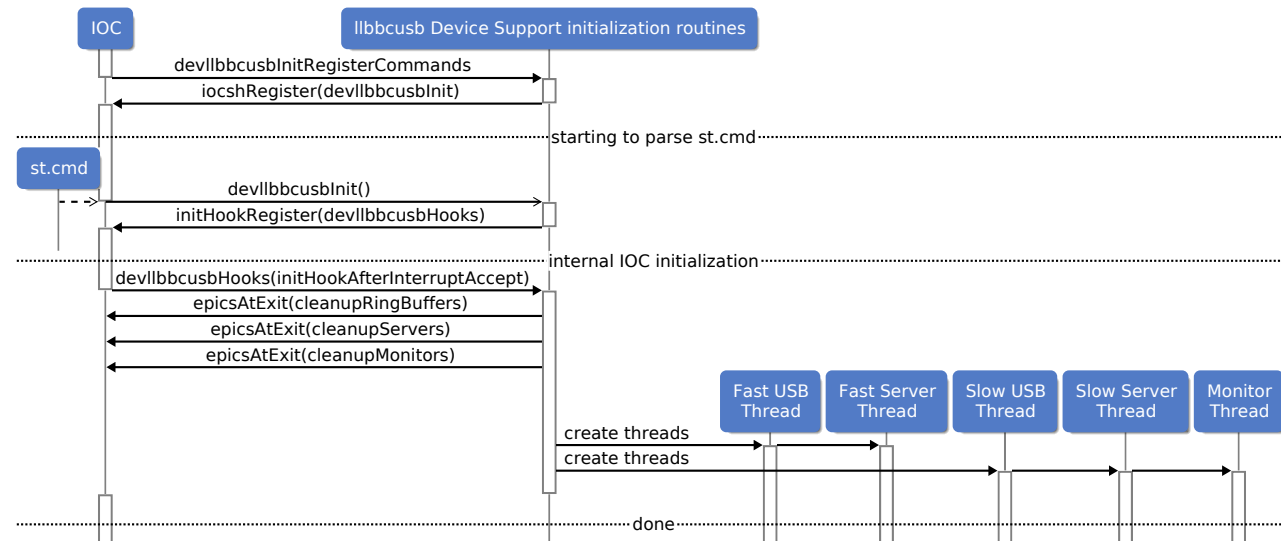


Abb. B.2.: Nachrichten-Reihenfolge-Diagramm der Initialisierungsphase des ursprünglichen *llbcbusb-Device-Support*-Moduls. Die Datei *st.cmd* enthält lediglich die allgemeine Anweisung `devllbcbusbinit()`. Anschließend werden genau so viele Threads erzeugt, dass ein einzelnes Baugruppenträgerpaar ausgelesen werden kann. Dabei werden immer die zeitlich reduzierten Daten *und* die zeitlich nicht reduzierten Daten verarbeitet.

B.3. Vorgenommene Veränderungen

Die vorgenommenen Veränderungen am *llbbcusb-Device-Support*-Softwaremodul zielten auf eine freiere Konfigurierbarkeit desselben zur Laufzeit ab. D. h. Änderungen des genauen Verhaltens der Software sollten keine Veränderungen am Quelltext sowie dessen erneute Übersetzung und das Binden an die eigentliche Anwendung (das heißt meistens den IOC) erfordern. Hierzu waren zunächst zusätzliche IOC-Shell-Kommandos zu definieren. Diese sollten die Möglichkeit bieten die Erzeugung der für die jeweils vorliegende Hardwarekonfiguration erforderlichen Threads anzufordern. Das modifizierte *Device-Support*-Softwaremodul bietet im Einzelnen folgende Kommandos:

`devllbbcusbInit`

Zuvor das einzig definierte Kommando. Nimmt eine allgemeine Initialisierung vor. Werden keine weiteren Kommandos verwendet, bleibt das *Device-Support*-Modul in der neuen Version ohne Funktion.

`devllbbcusbSerialName (Name, Serial, Typ)`

Definiert einen frei wählbaren Namen, der für eine Schnittstelle mit dem angegebenen Typ und Seriennummer steht. Der Name lässt sich an anderer Stelle verwenden, um Bezug auf diese Schnittstelle zu nehmen.

`devllbbcusbFastReader (Name, Port)`

Merkt die Erzeugung von Threads und Datenstrukturen für die Auslese der mit Namen benannten Schnittstelle vor. Es werden die Threads zum Einlesen der Daten sowie der zur Bereitstellung derselben über LAN und ein *MultiReadRingBuffer* zur Pufferung erzeugt. Der Verbindungsaufbau über LAN ist über den angegebenen Port möglich.

`devllbbcusbSlowReader (Name, Port)`

Wie `devllbbcusbFastReader`. Zusätzlich wird ein `llbbcUSB10Monitor`-Thread erzeugt, der die Daten periodisch in EPICS-PVs überträgt.

Die Nachrichten-Reihenfolge-Diagramme in den Abbildungen [B.2](#) und [B.3](#) zeigen die Abläufe der Initialisierungsphasen des ursprünglichen und des modifizierten Softwaremoduls.

C. Verteilung des Referenzphasensignals

C.1. Anforderung

Die Messung der Phase eines Signals erfordert den Vergleich desselben mit der Phase eines definierten Referenzsignals. Um in 16 aktiven Regelkreisen und 16 Signaleingängen der Elektronik zur Auswertung der Phasenmonitorsignale die Phase messen zu können, muss auf diesen 32 Platinen das Referenzsignal zur Verfügung stehen. Eine Erzeugung auf den einzelnen Platinen kommt nicht infrage, da so keine feste Phasenbeziehung zwischen den einzelnen Platinen erreicht werden könnte. Daher muss das Signal von einem einzelnen Signalgenerator erzeugt werden und anschließend entsprechend oft aufgeteilt werden. Da es einen einzelnen Regelkreis gibt, welcher bei 6 GHz betrieben werden muss (vgl. [44]), ist außerdem ein mit dem 3-GHz-Signal phasenstarr verknüpftes 6-GHz-Signal erforderlich.

C.2. Aufbau

Abbildung C.1 zeigt den Aufbau der Referenzsignalverteilung. Das Signal wird von einem kommerziellen Signalgenerator erzeugt und anschließend um ca. 30 dB verstärkt. Ein Richtkoppler koppelt etwa 25 % der Hochfrequenzleistung in einen separaten Signalpfad aus. Diese wird in einem nichtlinearen Prozess zur Erzeugung eines phasenstarr frequenzverdoppelten 6-GHz-Signals verwendet. Die verbleibenden 75 % der Hochfrequenzleistung werden nun über einen Vierwegeteiler aufgeteilt und den einzelnen Verteilerboxen in den unterschiedlichen Schränken zugeführt. Die Abschwächer, die an verschiedenen Stellen eingebaut sind, sind so dimensioniert, dass für jede Regelschleife ein Referenzsignal mit 0-3 dBm zur Verfügung stehen.

Es stehen in der Summe 32 Ausgänge mit dem 3-GHz-Referenzsignal und 2 Ausgänge mit dem phasenstarr verknüpften 6-GHz-Referenzsignal zur Verfügung. Somit bleibt für beide Frequenzen jeweils ein Ausgang für Testzwecke frei.

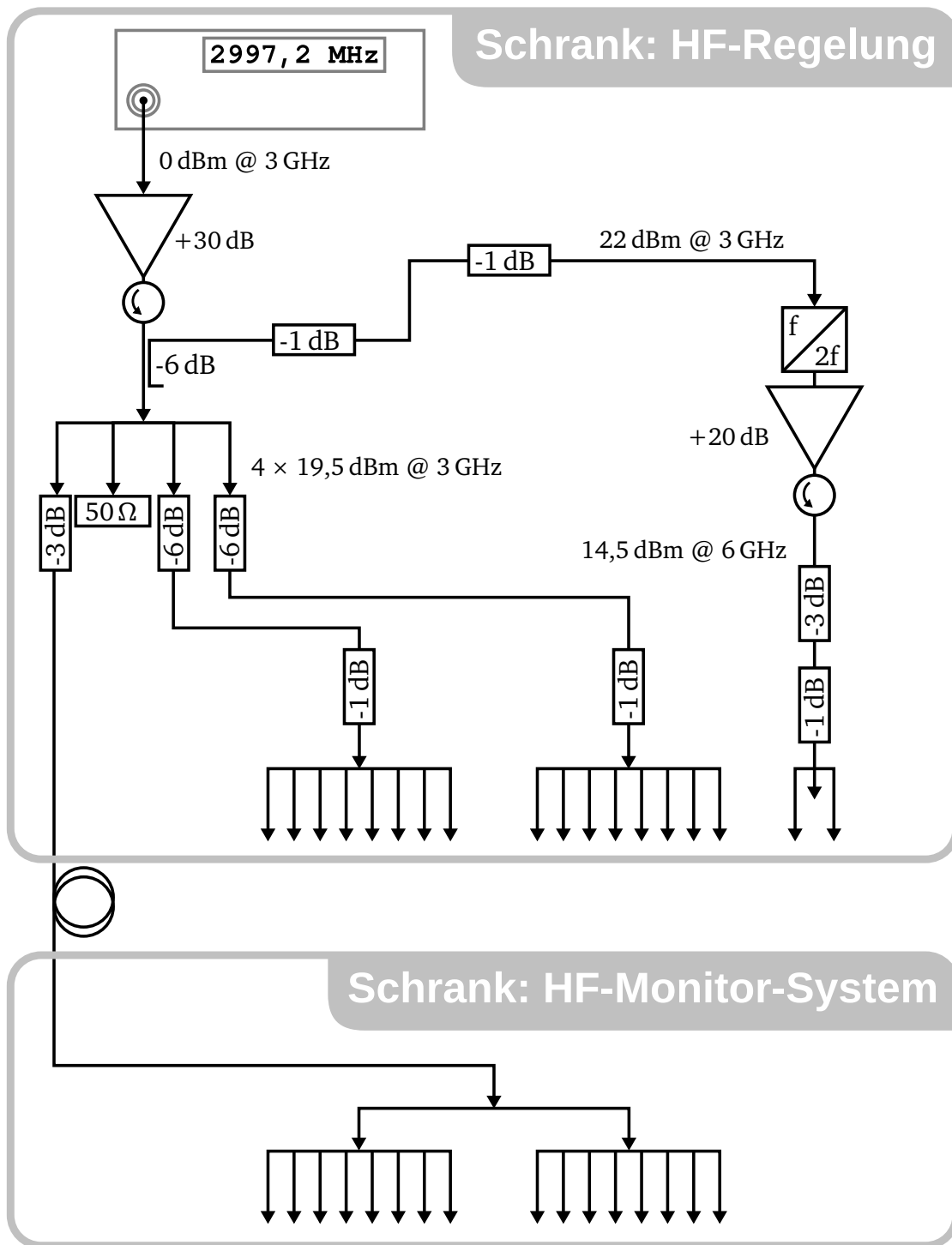


Abb. C.1.: Aufbau der Verteilung der Referenzphase nach Erweiterung für die Elektronik für die Auswertung der Phasenmonitor-Signale.

D. EPICS Process Variable Gateway

In Abschnitt 8.4.3 war die Konfiguration des *Channel-Access-Gateways* (CA-Gateway) aus Gründen der Übersichtlichkeit in vereinfachter Form erfolgt. Die Abbildungen dieses Anhangs sollen die genaue Konfiguration dokumentieren.

Abbildung D.1 zeigt eine hypothetische Konfiguration zum Austausch von Prozessdaten zwischen zwei Netzwerken. Sie beschreibt, wie die Bildung von Schleifen vermieden wird. Abbildung D.2 zeigt die tatsächlich am S-DALINAC eingesetzte Konfiguration. Es enthält insbesondere eine Instanz (**rev5**), die die Status-Processvariablen (welche durch die Server-Komponente jeden Gateways zur Verfügung gestellt werden) im Beschleunigernetzwerk verfügbar macht.

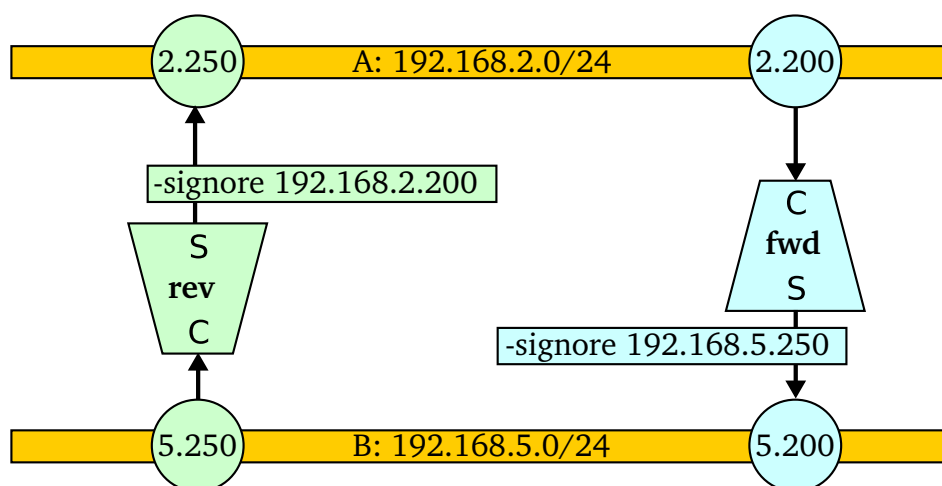


Abb. D.1.: Beispiel einer einfachen CA-Gateway-Konfiguration. Es wird angenommen, dass in beiden Netzwerken CA-Server sind. Damit auch die Prozessvariablen des jeweils anderen Netzwerks sichtbar sind, müssen zwei CA-Gateways eingerichtet werden. Dabei agieren die Gateways in jeweils einem Netzwerk als CA-Server und nehmen dort stellvertretend Anfragen für die im jeweils anderen Netzwerk lokalisierten CA-Server entgegen. Ohne besondere Maßnahmen würde dies zur Bildung von Schleifen führen, da Prozessvariablen nun in jedem Netzwerk sowohl direkt als auch über beide Gateways zugreifbar wären. Dies wird durch die angedeutete Option *-ignore* vermieden. Sie verbietet dem CA-Server einer CA-Gateway-Instanz Anfragen von der angegebenen IP-Adresse zu bearbeiten.

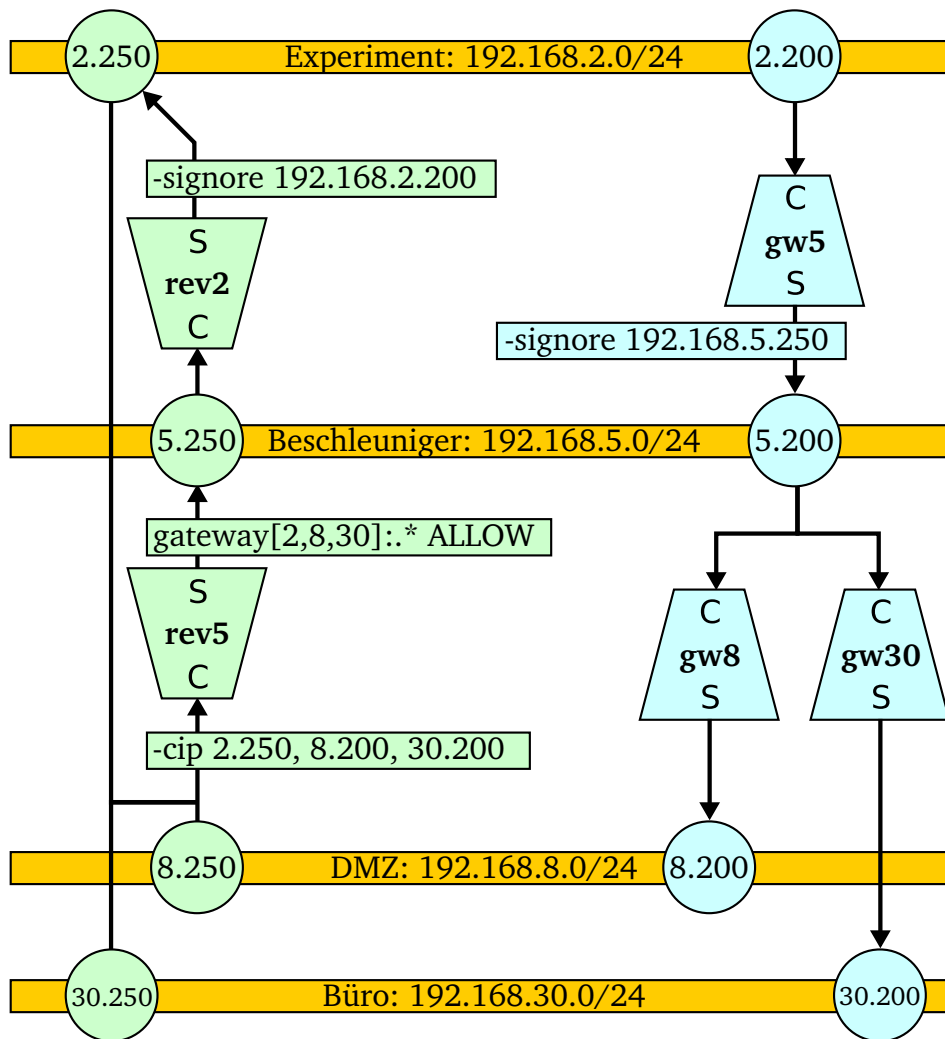


Abb. D.2.: Detail der tatsächlichen Konfiguration der CA-Gateways. Es werden insgesamt fünf Instanzen des CA-Gateways (Trapeze) auf zwei virtuellen Maschinen ausgeführt. Jede dieser beiden Maschinen hat zu jedem der Netzwerke jeweils eine Schnittstelle. Auf der linken Seite sind die Schnittstellen der Maschine der beiden *reverse Gateways* gezeigt (4. IP-Adressen-Byte „250“). Auf der rechten Seite sind die Schnittstellen und CA-Gateway-Instanzen der zweiten Maschine gezeigt (4. IP-Adressen-Byte „200“). Eine einzelne Gateway-Instanz stellt eine asymmetrische Verbindung zwischen zwei Netzwerken dar. In ein oder mehreren Netzwerken tritt es als CA-Client (C) und in einem anderen Netzwerk als CA-Server auf (S). Die einigen Instanzen zugeordneten Optionen („-ignore“ und „-cip“) vermeiden die Bildung von Schleifen. Die Instanz **rev5** beantwortet aufgrund der auf der Serverseite dargestellten *Regel* ausschließlich Anfragen nach Prozessvariablen, die einen Namen des dort dargestellten Musters tragen.

Literaturverzeichnis

- [1] E. Rutherford: *The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom*. Philosophical Magazine **21**(6) 669–688, 1911. DOI: [10.1080/14786435.2011.617037](https://doi.org/10.1080/14786435.2011.617037). (Referenziert auf S. 2)
- [2] V. Hess: *Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten*. Physikalische Zeitschriften **13** 1084–1091, 1912. (Referenziert auf S. 2)
- [3] CERN Courier **12**(3), 1972. URL: <http://cds.cern.ch/record/1729464>. (Referenziert auf S. 2, 3)
- [4] J. Cockcroft and E. Walton: *Experiments with High Velocity Positive Ions*. Proc. Roy. Soc., A **129**(811) 477–489, 1930. URL: <http://www.jstor.org/stable/95496>. (Referenziert auf S. 2)
- [5] J. Cockcroft and E. Walton: *Experiments with High Velocity Positive Ions. (I) Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions*. Proc. Roy. Soc., A **136**(830) 619–637, 1932. DOI: [10.1098/rspa.1932.0107](https://doi.org/10.1098/rspa.1932.0107). (Referenziert auf S. 2)
- [6] J. Cockcroft and E. Walton: *Experiments with High Velocity Positive Ions. II. The Disintegration of Elements by High Velocity Protons*. Proc. Roy. Soc., A **137**(831) 229–242, 1932. DOI: [10.1098/rspa.1932.0133](https://doi.org/10.1098/rspa.1932.0133). (Referenziert auf S. 2)
- [7] T. Aitken, T. Joy, and H. Price: *A review of the first four years of operation of the Nuclear Structure Facility tandem at Daresbury laboratory*. Nucl. Inst. & Meth. A **268**(2) 324–329, 1988. DOI: [10.1016/0168-9002\(88\)90528-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(88)90528-1). (Referenziert auf S. 3)
- [8] G. Ising: *Prinzip einer Methode Zur Herstellung von Kanalstrahlen hoher Voltzahl*. Ark. Mat. Astron. Fys. **18** 1–4, 1924. (Referenziert auf S. 3)
- [9] R. Wideröe: *Über ein neues Prinzip zur Herstellung hoher Spannungen*. Archiv für Elektrotechnik **21**(4) 387–406, 1928. DOI: [10.1007/BF01656341](https://doi.org/10.1007/BF01656341). (Referenziert auf S. 3)
- [10] E. O. Lawrence and M. S. Livingston: *The production of high speed light ions without the use of high voltages*. Phys. Rev. **40**(1) 19–35, 1932. DOI: [10.1103/PhysRev.40.19](https://doi.org/10.1103/PhysRev.40.19). (Referenziert auf S. 3)

- [11] C. Schwartz: *The Control System. Part IV – Pickup Electrodes*. Rev. Sci. Instrum. **24**(9) 851–853, 1953. DOI: [10.1063/1.1770844](https://doi.org/10.1063/1.1770844). (Referenziert auf S. 3)
- [12] F. Gudden, G. Fricke, H.-G. Clerc, and P. Brix: *Eine Anordnung für Experimente zur Elektronenstreuung unterhalb 60 MeV*. Zeitschrift für Physik **181**(5) 453–478, 1964. DOI: [10.1007/BF01380562](https://doi.org/10.1007/BF01380562). (Referenziert auf S. 4)
- [13] H.-D. Gräf, H. Miska, E. Spamer, O. Titze, and T. Walcher: *High Resolution Electron Scattering Facility at the Darmstadt Linear Accelerator (DALINAC): I. Accelerator*. Nucl. Inst. & Meth. A **153**(1) 9–15, 1978. DOI: [10.1016/0029-554X\(78\)90611-0](https://doi.org/10.1016/0029-554X(78)90611-0). (Referenziert auf S. 4)
- [14] T. Walcher, R. Frey, H.-D. Gräf, E. Spamer, and H. Theissen: *High Resolution Electron Scattering Facility at the Darmstadt Linear Accelerator (DALINAC): II. Beam Transport System and Spectrometer (Energy-Loss System)*. Nucl. Inst. & Meth. A **153**(1) 17–28, 1978. DOI: [10.1016/0029-554X\(78\)90612-2](https://doi.org/10.1016/0029-554X(78)90612-2). (Referenziert auf S. 4, 7)
- [15] H. Genz, H. Gräf, J. Horn, V. Huck, K. Hummel, M. Knirsch, C. Lüttge, A. Richter, T. Rietdorf, K. Rühl, P. Schardt, E. Spamer, A. Stiller, F. Thomas, O. Titze, J. Töpper, and H. Weise: *Operational Experience and Results from the S-DALINAC*. In *Proc. of EPAC 1992*, 49–51. Berlin, Deutschland. URL: http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e92/PDF/EPAC1992_0049.PDF. (Referenziert auf S. 4)
- [16] M. Konrad: *Development and commissioning of a digital rf control system for the S-DALINAC and migration of the accelerator control system to an EPICS-based system*. Dissertation, D17, Technische Universität Darmstadt, 2013. [urn:nbn:de:tuda-tuprints-33981](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-33981). (Referenziert auf S. 4, 9, 12, 13, 17, 18, 19, 21, 32, 33, 37, 39, 46, 50, 54, 57, 58, 60, 64, 67, 74, 75, 76, 77, 78, 88, 89, 98, 99, 102, 108)
- [17] Y. Fritzsche: *Aufbau und Inbetriebnahme einer Quelle polarisierter Elektronen am supraleitenden Darmstädter Elektronenlinearbeschleuniger S-DALINAC*. Dissertation, D17, Technische Universität Darmstadt, 2011. [urn:nbn:de:tuda-tuprints-28015](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-28015). (Referenziert auf S. 4, 19)
- [18] F. Hug: *Erhöhung der Energieschärfe des Elektronenstrahls am S-DALINAC durch nicht-isochrones Rezirkulieren*. Dissertation, D17, Technische Universität Darmstadt, 2013. [urn:nbn:de:tuda-tuprints-34695](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-34695). (Referenziert auf S. 4, 16, 19)

- [19] M. Arnold: *Auslegung, Planung und Aufbau einer dritten Rezirkulation mit ERL-Modus für den S-DALINAC – Dissertation eingereicht*. Dissertation, D17, Technische Universität Darmstadt, 2017. [nbn-resolving.de/urn:nbn:de:tuda-tuprints-59401](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-59401). (Referenziert auf S. 4, 6, 66, 80, 86)
- [20] L. Jürgensen. *Dissertation in Vorbereitung*. (Referenziert auf S. 4, 6, 79)
- [21] Y. Poltoratska, C. Eckardt, W. Ackermann, K. Aulenbacher, T. Bahlo, R. Bar-day, M. Brunken, C. Burandt, R. Eichhorn, J. Enders et al.: *Status and recent developments at the polarized-electron injector of the superconducting Darmstadt electron linear accelerator S-DALINAC*. Journal of Physics: Conference Series **298** 012002, 2011. DOI: [10.1088/1742-6596/298/1/012002](https://doi.org/10.1088/1742-6596/298/1/012002). (Referenziert auf S. 4)
- [22] L. Jürgensen: *Simulation, Design und Aufbau von Elektronen-Scrapersystemen für den S-DALINAC*. Master-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2013 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 5, 79)
- [23] S. Sievers: *Verbesserung der Güte der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen des S-DALINAC durch thermische Behandlung*. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2007 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 6)
- [24] T. Bahlo. *Dissertation in Vorbereitung*. (Referenziert auf S. 6, 17)
- [25] J. Wissmann. *Master-Thesis in Vorbereitung (nicht zur Veröffentlichung vorgesehen)*. (Referenziert auf S. 6)
- [26] K. Sonnabend, D. Savran, J. Beller, M. Büssing, A. Constantinescu, M. Elvers, J. Endres, M. Fritzsche, J. Glorius, J. Hasper et al.: *The Darmstadt High-Intensity Photon Setup (DHIPS) at the S-DALINAC*. Nucl. Inst. & Meth. A **640**(1) 6–12, 2011. DOI: [10.1016/j.nima.2011.02.107](https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.02.107). (Referenziert auf S. 7)
- [27] D. Savran, K. Lindenberg, J. Glorius, B. Löher, S. Müller, N. Pietralla, L. Schnorrenberger, V. Simon, K. Sonnabend, C. Wälzlein et al.: *The low-energy photon tagger NEPTUN*. Nucl. Inst. & Meth. A **613**(2) 232–239, 2010. DOI: [10.1016/j.nima.2009.11.038](https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.11.038). (Referenziert auf S. 7)
- [28] C. Lüttge, C. Hofmann, J. Horn, F. Neumeyer, A. Richter, G. Schrieder, E. Spamer, A. Stiller, D. Sober, S. Matthews et al.: *Large-aperture system for high-resolution 180° electron scattering*. Nucl. Inst. & Meth. A **366**(2) 325–331, 1995. DOI: [10.1016/0168-9002\(95\)00497-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(95)00497-1). (Referenziert auf S. 7)

- [29] P. von Neumann-Cosel, C. Rangacharyulu, A. Richter, G. Schrieder, A. Stascheck, and S. Strauch: *Complete Spectroscopy of an Isobaric Analog Resonance with the $(e, e' p)$ Reaction*. Phys. Rev. Lett. **78**(15) 2924–2927, 1997. DOI: [10.1103/PhysRevLett.78.2924](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.2924). (Referenziert auf S. 7)
- [30] W. Cunningham: *The WyCash portfolio management system*. ACM SIGPLAN OOPS Messenger **4**(2) 29–30, 1993. DOI: [10.1145/157709.157715](https://doi.org/10.1145/157709.157715). (Referenziert auf S. 9)
- [31] *S-DALINAC Quelltext Versionsverwaltungssystem*, URL: svn://b1.ikp.physik.tu-darmstadt.de/acs/, abgerufen am 21.11.2016. (Referenziert auf S. 10, 77)
- [32] T. Bahlo: *Konfiguration und Test eines Hochfrequenz-Chopper- und Bunchersystems für den S-DALINAC*. Bachelor-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2010 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 12)
- [33] P. Schardt: *Mikrowellenexperimente zum chaotischen Verhalten eines supraleitenden Stadion-Billards und Entwicklung einer Einfangsektion am S-DALINAC*. Dissertation, D17, Technische Hochschule Darmstadt, 1995. (Referenziert auf S. 12)
- [34] M. Platz: *Neuentwicklung und Aufbau einer Rechnerschnittstelle zur Ansteuerung der Geräte am S-DALINAC und Konzeption einer digitalen HF-Regelung*. Dissertation, D17, Technische Universität Darmstadt, 2004. (Referenziert auf S. 13, 53, 93)
- [35] U. Laier: *Güte der Beschleunigungsstrukturen und Entwicklung eines HF-Moduls am S-DALINAC*. Dissertation, D17, Technische Universität Darmstadt, 2004. (Referenziert auf S. 13)
- [36] M. Konrad: *Implementierung einfacher Regelalgorithmen für die digitale Hochfrequenzregelung am S-DALINAC*. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2008 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 13)
- [37] A. Araz: *Aufbau und Erprobung einer digitalen HF-Regelung und Aufbau eines modularen Messsystems zu Energiestabilisierung für den S-DALINAC*. Dissertation, D17, Technische Universität Darmstadt, 2009. [urn:nbn:de:tuda-tuprints-19105](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-19105). (Referenziert auf S. 13, 19, 53, 67, 68)
- [38] A. Araz, U. Bonnes, R. Eichhorn, F. Hug, M. Konrad, M. Platz, A. Richter, and R. Stassen: *3 GHz digital rf control at the superconducting Darmstadt electron linear accelerator: First results from the baseband approach and extensions for other frequencies*. Phys. Rev. ST Accel. Beams **13**(8) 082801, 2010. DOI: [10.1103/PhysRevSTAB.13.082801](https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.13.082801). (Referenziert auf S. 13)

- [39] M. Konrad, U. Bonnes, C. Burandt, R. Eichhorn, P. Nonn, J. Enders, and N. Pietralla: *Digital base-band rf control system for the superconducting Darmstadt electron linear accelerator*. Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**(5) 052802, 2012. DOI: [10.1103/PhysRevSTAB.15.052802](https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.15.052802). (Referenziert auf S. 13)
- [40] D. Flasche: *Entwicklung und Aufbau eines modularen und rechnergesteuerten Kontrollsystems für die Hochfrequenzregelung des Darmstädter supraleitenden Elektronenbeschleunigers*. Dissertation, D17, Technische Hochschule Darmstadt, 1989. (Referenziert auf S. 13, 21)
- [41] S. Döbert: *Nichtlineare Zeitreihenanalyse der Feldamplitude der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen und Aufbau eines HF-Monitorsystems zur zerstörungsfreien Strahldiagnose am S-DALINAC*. Dissertation, D17, Technische Universität Darmstadt, 1999. (Referenziert auf S. 16)
- [42] M. Reichenbach: *Bau und Erprobung von Strom- und Positionsmonitoren zur Strahlüberwachung am S-DALINAC sowie Rechnungen zur Strahlführung des FEL*. Diplomarbeit, Technische Hochschule Darmstadt, 1996 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 16)
- [43] M. Herbert: *Aufbau und Test eines Phasenmonitors für die Strahlstabilisierung am Injektor des S-DALINAC*. Bachelor-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2013 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 16)
- [44] C. Burandt: *Aufbau eines 6-GHz-Systems für die Hochfrequenz-Regelung am S-DALINAC*. Master-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2010 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 19, 113)
- [45] P. Nonn: *Entwicklung einer digitalen Hochfrequenzregelung für den gepulsten Betrieb des Protonenlinac Teststandes bei FAIR*. Dissertation, D17, Technische Universität Darmstadt, 2014. [urn:nbn:de:tuda-tuprints-40658](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-40658). (Referenziert auf S. 19, 36, 37, 39)
- [46] T. Kürzeder: *Entwicklung, Aufbau und Test eines neuen Kryostatmoduls für den S-DALINAC*. Dissertation, D17, Technische Universität Darmstadt, 2013. [urn:nbn:de:tuda-tuprints-33533](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-33533). (Referenziert auf S. 20, 22, 24, 31)
- [47] S. Sievers: *Untersuchung von Piezoaktoren zur Verbesserung der Frequenzabstimmung und Aufbau eines Quenchortungssystems für die Beschleunigungsstrukturen des S-DALINAC*. Dissertation, D17, Technische Universität Darmstadt, 2013. [urn:nbn:de:tuda-tuprints-35373](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-35373). (Referenziert auf S. 21, 22, 24, 25, 26, 27, 35)

- [48] *Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG*, URL: <https://www.physikinstrumente.com>, abgerufen am 11.9.2016. (Referenziert auf S. 25)
- [49] R. Grewe: *In-Situ Gütemessung der supraleitenden Beschleunigungsstrukturen des S-DALINAC*. Master-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2014 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 33)
- [50] A. Porcellato, S. Stark, F. Stivanello, L. Boscagli, F. Chiurlotto, D. Gio-
ra, and M. De Lazzari: *Improved on line performance of the installed
ALPI Nb sputtered QWRs*. In *Proc. of HIAT 2009*, 203–207. Venedig,
Italien. URL: [http://accelconf.web.cern.ch/Accelconf/HIAT2009/
papers/fr-03.pdf](http://accelconf.web.cern.ch/Accelconf/HIAT2009/papers/fr-03.pdf). (Referenziert auf S. 36, 41)
- [51] D. Bortolato, S. Pavinato, D. Pedretti, M. Betti, F. Gelain, D. Marca-
to, M. Bellato, R. Isocrate, and M. Bertocco: *New LLRF Control system
at LNL*. In *Real Time Conference (RT), 2016 IEEE-NPSS*, 1–8. DOI:
[10.1109/RTC.2016.7543105](https://doi.org/10.1109/RTC.2016.7543105). (Referenziert auf S. 43, 44)
- [52] G. Fortuna, R. Pengo, G. Bassato, I. Ben-Zvi, J. Larson, J. Sokolowski,
L. Badan, A. Battistella, G. Bisoffi, G. Buso, M. Cavenago, F. Cervellera,
A. Dainelli, A. Facco, P. Favaron, A. Lombardi, S. Marigo, M. Moisio, V. Pal-
mieri, A. Porcellato, K. Rudolph, R. Preciso, and B. Tiveron: *The ALPI
project at the Laboratori Nazionali di Legnaro*. Nucl. Inst. & Meth. A **287**(1)
253–256, 1990. DOI: [10.1016/0168-9002\(90\)91803-J](https://doi.org/10.1016/0168-9002(90)91803-J). (Referenziert auf
S. 44)
- [53] I. Ben-Zvi, M. Birk, C. Broude, G. Gitliz, M. Sidi, J. Sokolowski, and J. Bren-
nan: *The control and electronics of a superconducting booster module*. Nucl.
Inst. & Meth. A **245**(1) 1–12, 1986. DOI: [10.1016/0168-9002\(86\)90251-2](https://doi.org/10.1016/0168-9002(86)90251-2).
(Referenziert auf S. 44)
- [54] M. Hertling: *Aufbau einer zentralen relationalen Datenbank und Entwicklung
einer graphischen Benutzeroberfläche für den S-DALINAC*. Dissertation, D17,
Technische Universität Darmstadt, 2008. (Referenziert auf S. 46, 53, 69, 70, 71,
90, 92)
- [55] S. Richter: *Design and implementation of a new local control system at the
S-DALINAC*. Dissertation, D17, Technische Universität Darmstadt, 2001.
[urn:nbn:de:tuda-tuprints-1038](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-1038). (Referenziert auf S. 46, 53, 54)
- [56] *EPICS – Experimental Physics and Industrial Control System*, URL: <http://www.aps.anl.gov/epics/>, abgerufen am 1.5.2016. (Referenziert auf S. 46)

- [57] J. O. Hill: *EPICS R3.14 Channel Access Reference Manual*, URL: <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/12-docs/CAref.html>, abgerufen am 1.5.2016. (Referenziert auf S. 49)
- [58] *Channel Access – Protocol Specification*, URL: <http://www.aps.anl.gov/epics/base/R3-14/12-docs/CAref.html>, abgerufen am 11.8.2016. (Referenziert auf S. 49)
- [59] O. Patalakha: *Design and implementation of a modular client/server control system for the S-DALINAC*. Dissertation, D17, Technische Universität Darmstadt, 2006. (Referenziert auf S. 53, 55, 93)
- [60] A. Kuhl: *Aufbau einer Kanonensteuerung auf HV-Potential und Entwicklung einer Prozessdatenerfassung mit dem QM07 für den S-DALINAC*. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2009 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 53, 97)
- [61] L. R. Dalesio, J. O. Hill, M. R. Kraimer, S. Lewis, D. Murray, S. Hunt, M. Claussen, W. Watson, and J. Dalesio: *The Experimental Physics and Industrial Control System Architecture: Past, Present, and Future*. Nucl. Inst. & Meth. A **352**(1) 179–184, 1994. DOI: [10.1016/0168-9002\(94\)91493-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)91493-1). (Referenziert auf S. 54)
- [62] R. Lange, J. Anderson, A. Johnson, M. Kraimer, W. Norum, L. Dalesio, and J. Hill: *EPICS: recent developments and future perspectives*. In *Proc. of ICALEPCS 2003*, 278–281. Gyeongju, Korea, 2003. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ica03/PAPERS/TU601.PDF>. (Referenziert auf S. 55)
- [63] T. Schösser. *Dissertation in Vorbereitung*. (Referenziert auf S. 57, 64, 67, 75, 91, 97, 104)
- [64] C. Burandt, U. Bonnes, J. Enders, F. Hug, M. Konrad, and N. Pietralla: *Status of the Migration of the S-DALINAC Accelerator Control System to EPICS*. In *Proc. of PCaPAC 2012*, 166–168. Kalkutta, Indien, 2012. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/pcapac2012/papers/thpd14.pdf>. (Referenziert auf S. 57)
- [65] C. Burandt, U. Bonnes, J. Enders, F. Hug, N. Pietralla, T. Schösser, and M. Konrad: *The EPICS-based Accelerator Control System of the S-DALINAC*. In *Proc. of ICALEPCS 2013*, 332–335. San Francisco, CA, USA, 2013. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ICALEPCS2013/papers/moppc098.pdf>. (Referenziert auf S. 57)

- [66] C. Burandt, U. Bonnes, J. Enders, M. Konrad, and N. Pietralla: *SocketCAN device support for EPICS IOCs*. In *Proc. of PCaPAC 2012*, 163–165. Kolkata, Indien, 2012. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/pcapac2012/papers/thpd13.pdf>. (Referenziert auf S. 58)
- [67] M. Rivers: *asynDriver: Asynchronous Driver Support*, URL: <http://www.aps.anl.gov/epics/modules/soft/asyn/>, abgerufen am 11.8.2016. (Referenziert auf S. 61)
- [68] M. R. Kraimer, M. Rivers, and E. Norum: *EPICS: Asynchronous driver support*. In *Proc. of ICALEPCS 2005*, PO2.074–5. Genf, Schweiz, 2005. URL: http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ica05/proceedings/pdf/P3_074.pdf. (Referenziert auf S. 61)
- [69] D. Schirmer, B. Keil, E. Kasel, and D. Zimoch: *Standardization of the DELTA Control System*. In *Proc. of ICALEPCS 1999*, 75–77. Triest, Italien, 1999. URL: <http://cds.cern.ch/record/532723/files/wc1p19.pdf>. (Referenziert auf S. 61)
- [70] D. Zimoch: *EPICS at PSI – StreamDevice 2*, URL: <http://epics.web.psi.ch/software/streamdevice/>, abgerufen am 11.8.2016. (Referenziert auf S. 61)
- [71] *MODBUS Protocol Specification*, URL: http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf, abgerufen am 13.8.2016. (Referenziert auf S. 61, 62)
- [72] *modbus – EPICS Device Support Module*, URL: <http://cars9.uchicago.edu/software/epics/modbus.html>, abgerufen am 11.8.2016. (Referenziert auf S. 62)
- [73] D. Zimoch: *EPICS at PSI – PLC communication*, URL: <http://epics.web.psi.ch/software/s7plc/>, abgerufen am 11.8.2016. (Referenziert auf S. 62)
- [74] S. Marsching: *A new EPICS device support for S7 PLCs*. In *Proc. of ICALEPCS 2013*, 1147–1149. San Francisco, CA, USA, 2013. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ICALEPCS2013/papers/thppc027.pdf>. (Referenziert auf S. 62)
- [75] S. Marsching: *s7nodave Device Support for EPICS*, URL: <http://oss.aquenos.com/epics/s7nodave/>, abgerufen am 11.8.2016. (Referenziert auf S. 62)

- [76] *RFC 1006 – ISO Transport Service on top of the TCP, Version: 3*, URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc1006>, abgerufen am 13.8.2016. (Referenziert auf S. 63)
- [77] *IBHsoftec Gesellschaft für Automatisierungstechnik mbH*, URL: <https://www.ibhsoftec.com>, abgerufen am 7.11.2016. (Referenziert auf S. 63)
- [78] *LIBNODEAVE – Exchange data with Siemens PLCs*, URL: <http://libnodave.sourceforge.net/>, abgerufen am 11.8.2016. (Referenziert auf S. 63)
- [79] A. Krugmann: *Entwicklung einer lokalen Target-Steuerung am S-DALINAC*. Bachelor-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2006 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 64)
- [80] J. Auerhammer, H. Genz, H. Graef, V. Huck, C. Luettge, A. Richter, T. Rietdorf, P. Schardt, E. Spamer, K. Rühl et al.: *Latest of the superconducting Darmstadt Electron Accelerator S-DALINAC*. In *Proc. of SRF 1991*, 110–120, 1991. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/SRF91/papers/srf91b08.pdf>. (Referenziert auf S. 65)
- [81] P. Dijkstal: *Aufbau eines Systems zur Emittanzmessung am Elektronenstrahl des S-DALINAC*. Bachelor-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2014 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 66)
- [82] P. Dijkstal, M. Arnold, C. Burandt, F. Hug, and N. Pietralla: *Automated Transverse Beam Emittance Measurement using a Slow Wire Scanner at the S-DALINAC*. In *Proc. of IPAC 2015*, 817–819. Richmond, VA, USA, 2015. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2015/papers/mopha020.pdf>. (Referenziert auf S. 66)
- [83] A. Kaiser: *Entwicklung eines Weißlichtsuperkontinuums, eines Kontrollsystems sowie weiterer Komponenten der Testquelle spinpolarisierter Elektronen Photo-CATCH*. Master-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2015 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 74)
- [84] H. A. Rösch: *Erstellung einer LabVIEW-basierten Oberfläche mit innovativer Steuerung für das Kontrollsystem der Testquelle spinpolarisierter Elektronen Photo-CATCH*. Bachelor-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2015 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 74)
- [85] G. Steinhilber: *Verfahrsteuerung und Stromauslese am QCLAM-Spektrometer*. Bachelor-Thesis, Technische Universität Darmstadt, 2013 (unveröffentlicht). (Referenziert auf S. 74)

- [86] *The EPICS Archiver Appliance*, URL: https://slacmshankar.github.io/epicsarchiver_docs/index.html, abgerufen am 8.11.2016. (Referenziert auf S. 75)
- [87] A. N. Johnson, J. B. Anderson, M. Davidsaver, and R. Lange: *Not Dead Yet: Recent Enhancements and Future Plans for EPICS Version 3*. In *Proc. of ICALEPCS 2013*, 457–459. San Francisco, CA, USA, 2013. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ICALEPCS2013/papers/moppc148.pdf>. (Referenziert auf S. 76)
- [88] *debian – The universal operating system*, URL: <https://www.debian.org/>, abgerufen am 21.8.2016. (Referenziert auf S. 76)
- [89] *NSLS-II controls package repository*, URL: <http://epics.nsls2.bnl.gov/debian/>, abgerufen am 21.8.2016. (Referenziert auf S. 78)
- [90] *synApps: tpmac*, URL: <https://www.gmca.aps.anl.gov/TPMAC2/>, abgerufen am 24.9.2016. (Referenziert auf S. 85)
- [91] M. Konrad, C. Burandt, J. Enders, and N. Pietralla: *Control System Studio Archiver with PostgreSQL Back-End: Optimizing Performance and Reliability for a Production Environment*. In *Proc. of PCaPAC 2012*, 15–17. Kalukutta, Indien, 2012. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/pcapac2012/papers/wepd03.pdf>. (Referenziert auf S. 88)
- [92] *BURT: Back Up and Restore Tool*, URL: <http://www.aps.anl.gov/epics/extensions/burt/index.php>, abgerufen am 11.9.2016. (Referenziert auf S. 93)
- [93] G. Shen, Y. Hu, M. Kraimer, K. Shroff, and D. Dezman: *NSLS II Middleware Services*. In *Proc. of ICALEPCS 2013*, 467–470. San Francisco, CA, USA, 2013. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ICALEPCS2013/papers/moppc155.pdf>. (Referenziert auf S. 96)
- [94] *Control System Studio*, URL: <http://controlsystemstudio.org/>, abgerufen am 21.8.2016. (Referenziert auf S. 96)
- [95] K. Kasemir, X. Chen, J. Purcell, and E. Danilova: *SNS Online Display Technologies for EPICS*. In *Proc. of ICALEPCS 2011*, 1178–1181. Grenoble, Frankreich, 2011. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/icalepcs2011/papers/thbhaust01.pdf>. (Referenziert auf S. 97)
- [96] *Web Channel Access client framework*, URL: <http://webca.cosylab.com/index.html>, abgerufen am 21.8.2016. (Referenziert auf S. 97)

- [97] X. Chen and K. Kasemir: *Bringing control system user interfaces to the web*. In *Proc. of ICALEPCS 2013*, 1048–1051. San Francisco, CA, USA, 2013. URL: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ICALEPCS2013/papers/thcoaab03.pdf>. (Referenziert auf S. 97)
- [98] K. Evans and M. Smith: *Experience with the EPICS PV Gateway at the APS*. In *Proc. of PAC 2005*, 3621–3623. Knoxville, TN, USA, 2005. DOI: [10.1109/PAC.2005.1591559](https://doi.org/10.1109/PAC.2005.1591559). (Referenziert auf S. 101)
- [99] K. Evans: *The EPICS process variable gateway – version 2*. In *Proc. of ICALEPCS 2005*, PO1.033–6. Genf, Schweiz, 2005. URL: http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ica05/proceedings/pdf/P1_033.pdf. (Referenziert auf S. 101)
- [100] *Gateway: The Process Variable Gateway*, URL: <http://www.aps.anl.gov/epics/extensions/gateway/index.php>, abgerufen am 1.5.2016. (Referenziert auf S. 101)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen Dank aussprechen, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. Joachim Enders danke ich für die unkomplizierte Aufnahme in seine Arbeitsgruppe und die Freiheit, welche mir bei der Wahl meines Arbeitsgebietes gelassen wurde. Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Norbert Pietralla danke ich für die Übernahme des Korreferates und die Gespräche, welche zur Formung dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Dr. Martin Konrad danke ich für die Betreuung und den Rat, welche er mir zukommen ließ.

Herrn Prof. Dr. Ralf Eichhorn verdanke ich die Motivation eine Master-Thesis am S-DALINAC zu verfassen. Er ermöglichte mir insbesondere die Teilnahme an der Beschleunigerschule USPAS. Herrn Prof. Dr. Florian Hug danke ich für das Vertrauen in meine Arbeit am Kontrollsystem und die Übertragung der mit den Bereitschaftsdiensten verbundenen Verantwortung, sowie die Möglichkeit internationale Konferenzen zu besuchen.

Herrn Dr. Thorsten Kürzeder danke ich für das trotz aller Pannen bestehende Vertrauen und die Begleitung in der Endphase dieser Dissertation. Herrn Dr. Jonny Birkhan danke ich für die Wertschätzung meiner Arbeit und seine Anregungen zu meiner Dissertation.

Herrn Uwe Bonnes gilt mein Dank für die immer währende Bereitschaft der schnellen Problemlösung und dem Engagement bei der Neuentwicklung von Elektronik. Seinen Mitarbeitern danke ich für die unkomplizierte Hilfsbereitschaft bei schnellen Reparaturen und Anfertigungen.

Herrn Dr. Michael Hertling danke ich für die Betreuung meiner Miniforschung am IKP, welche die ersten Schritte im Bereich der Kontrollsysteme bedeuteten.

Allen Mitarbeitern der Beschleunigergruppe danke ich für die tolle Arbeitsatmosphäre und die Zusammenarbeit an der Maschine. Besonders danken möchte ich Michaela Arnold und Thore Bahlo für die direkten Kommentare, Fragen und Hinweisen in unterschiedlichsten Situationen. Für die ausführliche und sehr konstruktive Kritik an meiner Dissertation danke ich Thore Bahlo im Besonderen. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei allen Mitgliedern der Betriebsgruppe des

Beschleunigers. Die Installation unzähliger Geräte und die vielen Hinweise waren sehr wertvoll.

Herrn Manuel Steinhorst danke ich für die große Motivation und Selbstständigkeit während der Erstellung seiner Master-Thesis zur Implementierung von Online-Strahldynamiksimulationen und seinen Einsatz bei der Wiederinbetriebnahme des S-DALINAC.

Annika, welche Grammatik- und Rechtschreibung korrigierte, gebührt Dank, welcher sich aber noch viel mehr auf die Geduld, welche sie über die Jahre dieser Arbeit zeigte, bezieht. Meinen Kindern, die kein Verständnis für die Zeiteinteilung ihres Vaters zeigten, danke ich dafür, dass sie ihn immer wieder eben darauf aufmerksam machten.

Die vorliegende Arbeit wurde gefördert durch Mittel aus dem DFG Sonderforschungsbereich 634.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet und bisher noch keinen Promotionsversuch unternommen habe.

Darmstadt, den 21. November 2016

(Christoph Warwick Burandt)